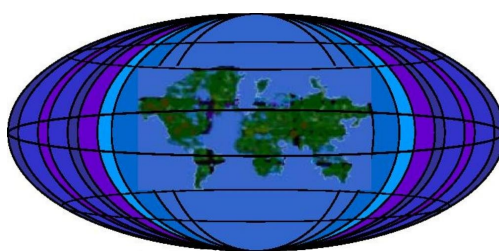


Analyse de la gestion des changements climatiques par les producteurs de maïs sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin

Thèse de Doctorat



**Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)**

072 B.P. : 50 Cotonou, Rep. du Bénin.

**Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Université d'Abomey-Calavi**

par

Cayossi Stève Ulrich Yvon ALLE

©ICMPA Publishing 2014



ICMPA - UNESCO Chair

Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN
Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

PhD N°.../PhD/CIPMA/FAST/UAC/2014.

Analyse de la gestion des changements climatiques par les producteurs de maïs sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin

Thèse de Doctorat
présentée pour obtenir le grade de
Docteur en Sciences de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
Option : **Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau**

Par
Cayossi Stève Ulrich Yvon ALLE

Jury :

M. Mahouton Norbert Houngbonou	Professeur Titulaire UAC	Président
M. Hassan Bismarck Nacro	Maître de Conférence UPB	Rapporteur
M. Expédit Wilfried Vissin	Maître de Conférence UAC	Examineur
M. Adolphe Adjanooun	Maître de Recherche INRAB	Examineur
M. Hervé Guibert	Docteur Agronome CIRAD	Examineur
M. Akambi Abel Afouda	Maître de Conférence UAC	Co-Directeur de Thèse
M. Kossi Euloge Agbossou	Professeur Titulaire UAC	Directeur de Thèse

Remerciements

Cette thèse doit son aboutissement, pour une grande part, aux soutiens de mes Directeurs de thèse, Professeurs Euloge K. AGBOSSOU et Abel A. AFOUDA. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour leurs encadrements rigoureux et la confiance qu'ils m'ont accordée.

Ma gratitude va également au Dr Hervé GUIBERT, sans qui je n'aurais pas pu avoir cette opportunité de thèse. J'ai particulièrement apprécié sa disponibilité et ses nombreuses relectures tout au long de ces années de thèse.

Je remercie Dr Pierre V. VISSOH pour toutes nos discussions scientifiques enrichissantes et ses relectures avisées.

Je remercie également Dr Leifi NODICHAO pour sa supervision tout au long des essais au champ, ses nombreux conseils toujours très avisés et ses encouragements.

J'exprime ma reconnaissance au Professeur Mahouton Norbert HOUNKONNOU, Président de la CIPMA - Chaire UNESCO, pour avoir accepté de présider mon Jury de thèse.

J'exprime également ma reconnaissance au Dr Hassan Bismarck NACRO et au Dr Harouna KARAMBIRI ; tous deux ont accepté de rapporter cette thèse. Ma reconnaissance va également à l'endroit du Dr Adolphe ADJANOHOOUN et du Dr Expédit W. VISSIN pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Pour cette thèse, j'ai bénéficié du soutien financier et scientifique du CIRAD auquel je tiens à exprimer toute ma gratitude, ainsi qu'à tous les CIRADiens en particulier : Philippe LETOURMY, Eric GOZE, Christian BARON, Denis FABRE, Bertrand Müller, Jocelyne SALLIN, Brigitte GIUDICELLI, Leticia ROUSSILLE, Valerie SOTI.

Durant mes années de thèse, j'ai eu la chance de bénéficier des compétences scientifiques, des qualités humaines et du soutien moral de nombreuses personnes. Je tiens à leur exprimer ici toute ma reconnaissance pour avoir contribué, de près comme de loin, à l'aboutissement de cette thèse. Il s'agit notamment de Dr Ezinvi

BALOÏTCHA, Dr Bernard AHAMIDE, Dr Irenikatche AKPONIKPE, Dr Agali ALHASSANE, Dr Abdou ALI, Dr Seydou TRAORE, Dr Emmanuel LAWIN, Dr François GUEDJE, Dr Moumouni SOUNMAILA, Monsieur Maurice AHOUAN-SOU. Je pense également aux enseignants, au personnel administratif ainsi qu'aux doctorants de la CIPMA (en l'occurrence Sama Arjika) qui m'ont beaucoup aidé. J'inclus aussi dans ce groupe les formidables personnes du CRAPP-Pobè, en particulier Monsieur Fataou SOUMOLA, Dr Hervé AHOLOUKPE, Messieurs Mikpon, Philippe, Abdon, Akandé, Da Cruz, Evariste, Alexis.

Je tiens à remercier très spécialement, mes parents, mes frères et mon épouse Prisca pour leur soutien et leur présence de tous les instants. Je tiens à exprimer particulièrement toute ma gratitude à mon oncle, Dr Etienne HOUNGNINOU pour son soutien inconditionnel.

Je pense également à mes cousins en France et en Suisse, notamment à Feue Angeline, à Anatole, Eric, Régis, leurs conjointes et leurs enfants, pour tous les moments joyeux passés ensemble lors de mes séjours en France.

Merci, à Erik et David HOUNGNINOU, Jaurès LOKONON, Karelle MEHIS-SOU, Gisèle SEHLIN, Marleine MICHOSOUNON et Amos ATODJINOU qui m'ont soutenu et encouragé.

Résumé

L'impact sociétal du climat et la gestion des changements climatiques par les populations rurales, très largement documentés au Sahel, sont encore très peu analysés en région guinéenne. Pour apporter une contribution scientifique à la compréhension du cas de la région guinéenne ce travail a analysé la cohérence de la perception qu'ont les producteurs des changements climatiques et la pertinence de leurs mesures d'adaptation par rapport aux observations climatiques scientifiquement organisés. L'approche méthodologique adoptée a consisté à comparer les tendances climatiques (précipitations, températures et vitesses de vents) avec les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques. En outre, les risques agroclimatiques liés aux choix de gestion du calendrier agricole ont été analysés à l'aide du modèle de croissance SARRA-H. Les données climatiques proviennent d'un réseau homogène de 14 stations et couvrent la période 1951-2010. Quant aux perceptions et mesures d'adaptation, elles ont été recueillies à partir d'une enquête auprès de 201 chefs d'exploitations agricoles (CE) en 2010.

Les résultats révèlent que les producteurs sont particulièrement sensibles aux changements des précipitations observés entre 1951-1970 et 1971-1990 au point où ils ne perçoivent pas la reprise des pluies amorcée dans les années 1990 dans la région d'étude, en l'occurrence pendant la petite saison des pluies. En outre, les producteurs ne perçoivent ni le réchauffement climatique pendant les saisons pluvieuses, ni la diminution des vents forts sur toute l'année. L'analyse des mesures d'adaptation adoptées par les producteurs montre que l'adaptation variétale et la modification des dates de semis sont les mesures les plus adoptées. Cependant, elles présentent d'importants risques de perte de production si le calendrier agricole n'est pas bien caler sur le cycle saisonnier des pluies.

Mots-clefs : Perception, adaptation, SARRA-H, maïsiculture, changements climatiques, plateau d'Allada

Abstract

The societal impact of weather and climate change management by rural communities which are widely documented in the Sahel, are still poorly analyzed in Guinean region. In order to provide a scientific input to understanding the case of the Guinean region, this work has analyzed the consistency of the perception of producers of climate change and the relevance of their adaptation compared to scientifically organized climate observations. The methodological approach adopted was to compare trends in climate (precipitation, temperature and wind speed) to the perceptions of the farmers of climate change. In addition, the agro-climatic risks related to the agricultural calendar management choices were analyzed using the growth model SARRA-H. Climate data come from a homogeneous network of 14 stations and cover the period from 1951 to 2010. For the perceptions and adaptation measures, they were collected through a survey of 201 farm managers in 2010.

Results show that producers are particularly sensitive to changes in precipitation observed between 1951-1970 and 1971-1990 to the point where they do not see the resumption of rains that began in the 1990s in the study area, in this case for the short rainy season. In addition, farmers do not perceive either the global warming during rainy seasons or the reduction of strong winds throughout the year. Analysis of adaptation measures adopted by farmers shows that varietal adaptation and change sowing dates are the most adopted measures. However, they present significant risks of loss of production if the agricultural calendar is not well aligned with the seasonal cycle of rainfall.

Keywords : Perception, adaptation, SARRA-H, corn production, climate change, Plateau of Allada

Table des matières

Liste des tableaux	x
Table des figures	xiii
Introduction	1
1 Cadres géographique, conceptuel et méthodologique de l'étude	7
1.1 Cadre Conceptuel de l'étude	7
1.2 Zone d'étude	10
1.3 Méthodologique générale de l'étude	15
2 Evolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010	28
2.1 Introduction	29
2.2 Données et méthode	30
2.3 Résultats et discussion	38
2.4 Conclusion de chapitre	48
3 Changements climatiques, perceptions et adaptations des producteurs sur le Plateau d'Allada au sud du Bénin	50
3.1 Introduction	51
3.2 Méthodologie	53
3.3 Résultats et discussion	58
3.4 Conclusion de chapitre	72
4 Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin	74
4.1 Introduction	75
4.2 Matériel et méthodes	77
4.3 Résultats et discussion	83
4.4 Conclusion de chapitre	98

5	Variabilité climatique et maïsiculture pluviale aux échelles interannuelle et intrasaisonnière au sud du Bénin	100
5.1	Introduction	101
5.2	Matériel et méthodes	103
5.3	Résultats et discussion	114
5.4	Conclusion de chapitre	124
6	Discussion générale	126
6.1	Synthèse des changements climatiques	126
6.2	Synthèse des perceptions des changements climatiques	129
6.3	Synthèse des mesures d'adaptation	135
	Conclusion générale et perspectives	139
	Références bibliographiques	145

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses	18
2.1	Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses	33
2.2	Probabilités de transition pour les chaînes de Markov à l'ordre 1.	37
2.3	Dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses au regard des critères d'Erpicum et <i>al.</i> , (1988) entre 1951 et 2010 au sud-Bénin.	38
2.4	Indices moyens du cumul pluviométrique, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux pour les trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Les indices ont été calculés sur la base des bornes variables (Tableau 2.3).	42
2.5	Indices moyens du cumul pluviométrique, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux pour les trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Les indices ont été calculés sur la base des bornes communes (du 15 avril au 14 juillet et du 14 septembre au 22 octobre).	43
2.6	Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la première saison des pluies définie sur la base des bornes variables.	45
2.7	Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la deuxième saison des pluies définie sur la base des bornes variables.	45

2.8	Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la première saison des pluies définie sur la base des bornes communes.	47
2.9	Probabilités de transition entre les jours secs et humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la deuxième saison des pluies définie sur la base des bornes communes.	47
3.1	Caractéristiques des données utilisées	54
3.2	Evolution du cumul saisonnier, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux de la grande saison des pluies (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) entre 1951-1970 et 1971-1990 (P1/P2), entre 1971-1990 et 1991-2010 (P2/P3) et entre 1951-1970 et 1991-1990 (P1/P3) sur le plateau d'Allada.	60
3.3	Evolution des séquences sèches de la grande saison (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada.	61
3.4	Evolution des dates de début et de fin de la grande saison (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada.	62
3.5	Caractéristiques des exploitations agricoles enquêtées	65
3.6	Perceptions des producteurs des changements de précipitations de la grande saison des pluies.	66
3.7	Perceptions des producteurs des changements de précipitations de la petite saison des pluies.	67
3.8	Perceptions des producteurs des changements de températures journalières.	68
3.9	Perceptions des producteurs des changements des forces des vents journaliers.	68
3.10	Perceptions des producteurs des causes de changements climatiques. . .	69
3.11	Principales mesures d'adaptation individuelles des chefs d'exploitation .	71

4.1	Caractéristiques des stations pluviométriques et synoptiques étudiées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses	78
4.2	Classes des vitesses de vents et leurs manifestations sur l'échelle de Beaufort	82
4.3	Evolution pluri-décennale des variables pluviométriques entre 1951-1970 et 1971-1990 (P1/P2), entre 1971-1990 et 1991-2010 (P2/P3) et entre 1951-1970 et 1991-2010 (P1/P3) sur le plateau d'Allada (Région) et sur la station de Niaouli.	86
4.4	Evolution pluri-décennale des séquences sèches pour les trois sous- périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada (Région) et sur la station de Niaouli.	87
4.5	Evolution pluri-décennale des dates de début et de fin de la grande saison des pluies (GSP, mars à juillet) et de la petite saison des pluies (PSP, septembre à novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada et sur la station de Niaouli.	89
4.6	Caractéristiques des 201 exploitations agricoles enquêtées.	92
4.7	Perceptions paysannes de la variabilité pluviométrique et mesures d'adapt- ation des 201 exploitations agricoles.	93
4.8	Perceptions paysannes de la variabilité pluviométrique des trois groupes de villages autour de la station de Niaouli.	95
4.9	Perceptions paysannes des changements des températures et des forces des vents et mesures d'adaptation des 201 exploitations agricoles.	96
5.1	Caractéristiques des stations et données utilisées	105
5.2	Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la phénologie de la variété DMR-ESR-W du maïs.	110
5.3	Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la biomasse de la variété DMR-ESR-W du maïs.	111
5.4	Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la mise en place de la surface foliaire de la variété DMR- ESR-W du maïs.	112
5.5	Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation du rendement potentiel de la variété DMR-ESR-W du maïs.	112

5.6	Moyennes décennales des descripteurs intrasaisonniers des saisons des pluies moyennées sur les stations de Niaouli et de Ouidah.	118
6.1	Perceptions des CE et tendances pluviométriques observées sur la grande et la petite saison des pluies à l'échelle du plateau d'Allada.	130
6.2	Récapitulatif des mesures d'adaptation aux changements climatiques spécifiques à l'agriculture sur la base de la classification de Chuku et Okoye (2009)	135

Table des figures

1.1	Shéma conceptuel montrant les interactions entre changements climatiques, perceptions et stratégies d'adaptation	10
1.2	Localisation du plateau d'Allada	11
1.3	Cycle saisonnier moyen des précipitations sur le Sud du Bénin entre 1951-2010. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 3 jours, 7 jours et 11 jours.	13
1.4	Cycle saisonnier moyen des températures à la station synoptique de Cotonou entre 1953-2010.	13
1.5	Cycle saisonnier moyen des vitesses moyennes journalières de vents à la station synoptique de Cotonou entre 1961 et 2010.	14
1.6	Réseau des 14 stations climatiques sélectionnées.	17
1.7	Localisation des villages étudiés	20
1.8	Schéma du dispositif expérimental de l'essai irrigué.	21
1.9	Expérimentation agricole en conditions d'approvisionnement en eau (irrigation à 5 mm/j par goutte à goutte) et de fertilité du sol (100 Kg/ha de NPK et 50 kg/ha d'urée) non limitantes.	22
1.10	Schéma du dispositif expérimental de l'essai pluvial.	22
1.11	Plants prélevés.	24
1.12	Séparation des tiges, des feuilles vertes (2/3 de la feuille est verte), des feuilles sénescentes, des épis, des panicules mâles, des soies et des spathes.	24
1.13	Démarche méthodologique.	25
2.1	Zone d'étude et réseau de stations pluviométriques (ronds noirs) utilisées	31
2.2	Cycle saisonnier moyen des précipitations sur le Sud du Bénin entre 1951-2010. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 3 jours, 7 jours et 11 jours.	31

2.3	Indice pluviométrique (IPS), indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et indice du cumul moyen des jours pluvieux (IIJPS) de la première saison des pluies au sud-Bénin de 1951 à 2010.	40
2.4	Indice pluviométrique (IPS), indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et indice du cumul moyen des jours pluvieux (IIJPS) de la deuxième saison des pluies au sud-Bénin de 1951 à 2010.	41
2.5	Corrélation entre l'indice du cumul saisonnier (IPS) et, du haut vers le bas, l'indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et l'indice de leur cumul moyen (IIJPS) pour la première saison des pluies (à gauche en jaune) et la deuxième saison des pluies (à droite en rouge), au sud-Bénin entre 1951-2010.	44
3.1	Localisation du plateau d'Allada, des villages enquêtés et du réseau d'observation du climat utilisé.	53
3.2	Variabilité interannuelle des pluies sur le plateau d'Allada entre 1951 et 2010.	58
3.3	Cycles saisonniers moyens des pluies journalières sur le plateau d'Allada pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3). Les valeurs sont des moyennes glissantes sur une fenêtre de 11 jours : de J-5 à J+5.	59
3.4	Variabilité interannuelle des températures sur le plateau d'Allada entre 1953 et 2010	63
3.5	Variabilité interannuelle des vitesses instantanées maximales des vents sur le plateau d'Allada entre 1961 et 2010	64
3.6	Adaptations face aux changements climatiques : projection des trois classes de chef d'exploitation (CE) dans le système d'axes factoriels à l'issue d'une analyse factorielle des correspondances simple (AFC). . . .	72
4.1	Localisation de la zone d'étude, des stations climatiques et des villages étudiés.	77
4.2	Variogramme climatologique journalier moyen brut ajusté avec un modèle exponentiel.	80
4.3	Variabilité inter-annuelle des pluies sur le plateau d'Allada entre 1951 et 2010.	84

4.4	Variabilité inter-annuelle des pluies sur la station entre 1951 et 2010.	85
4.5	Fréquences des températures minimales journalières pour les trois sous-périodes : 1953-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur la station synoptique de Cotonou.	89
4.6	Fréquences des températures maximales journalières pour les trois sous-périodes : 1953-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) à la station synoptique de Cotonou.	90
4.7	Fréquences des 8 classes de vitesses instantanées maximales des vents (« Légers » à « Fort coup de vent ») à la station synoptique de Cotonou entre 1961 et 2010.	91
5.1	Localisation du plateau d'Alida dans le Sud-Bénin et des stations étudiées.	104
5.2	Calibration et vérification du modèle SARRA-H.	114
5.3	Variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux entre 1971 et 2010 sur les stations de Niaouli et de Ouidah.	115
5.4	Scores de corrélations linéaires simples entre chaque variable pluviométrique et les rendements potentiels maximaux du maïs simulés par le modèle SARRA-H sur la période 1971-2010. Les lignes pointillées matérialisent les bornes de significativité à 95% lues dans les tables de Bravais Pearson dans le cas de 40 années.	117
5.5	Pourcentage de semis réussis entre février et Novembre sur la station de Niaouli.	120
5.6	Pourcentage de semis réussis entre février et Novembre sur la station de Ouidah.	121
5.7	Evolution des rendements potentiels (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) et des dates de début de la phase de dessiccation des grains en fonction de la date de semis à la station de Niaouli pour la période 1971-2010.	122
5.8	Evolution des rendements potentiels (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) et des dates de début de la phase de dessiccation des grains en fonction de la date de semis à la station de Ouidah pour la période 1971-2010.	123

Introduction générale

Les revenus des populations rurales d’Afrique de l’Ouest et leur sécurité alimentaire sont étroitement dépendants de l’agriculture pluviale qui occupe près de 93% des terres cultivées et produit environ 80% des céréales consommées en Afrique de l’Ouest (Sultan et *al.*, 2012). Selon un rapport de l’organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture, entre 50 et 80% de la population active de l’Afrique subsaharienne dépendent du secteur agricole et procurent plus de 90% des moyens d’existence à la population totale (FAO, 2006). Dans ce contexte, les populations rurales d’Afrique soudano-sahélienne sont particulièrement vulnérables aux aléas climatiques (Hansen, 2002 ; Barbier et *al.*, 2009). Cette vulnérabilité est accrue par la faible fertilité des sols (Payne et *al.*, 1991 ; Breman et *al.*, 2001) et par l’accroissement rapide des populations (Sultan et *al.*, 2012). Par ailleurs, pour la culture de céréales, les populations rurales d’Afrique subsaharienne sont soumises à de fortes pressions financières du fait de l’absence de subventions et de crédits agricoles, de régulations des coûts (intrants, engrais, mécanisation...) et d’organisation de réseaux (Forest et Clopes, 1994). Cette insécurité financière aggrave la vulnérabilité de ces populations aux aléas climatiques : c’est ainsi qu’elles ont subi, du fait des périodes de sécheresses qui se sont succédé depuis les années 1970, des vagues de famines (perte des récoltes, décimation du cheptel, migrations des populations) ayant nécessité un recours à l’aide alimentaire internationale (Dilley et *al.*, 2005). Cette succession quasi ininterrompue d’années anormalement sèches depuis la fin des années 1960 sur le sahel et, dans une moindre mesure, sur la région soudano-guinéenne a marqué les mémoires, interpellé les scientifiques et démontré la nécessité de mieux connaître et documenter la variabilité de la mousson africaine (Fontaine et *al.*, 2012).

Il s’avère que la pluviométrie d’Afrique de l’Ouest présente une importante variabilité interannuelle, à laquelle se superpose un signal décennal ou pluri-décennal fort (Nicholson et Palao, 1993 ; Le Barbé et Lebel, 1997 ; Le Barbé et *al.*, 2002 ; Le Lay et Galle, 2005 ; Sultan et *al.*, 2005 ; Caminade, 2010). En effet, les analyses spectrales

des longues séries de précipitations attestent d'une variabilité entre 2 et 4 ans au Sahel, entre 2 et 8 ans en région guinéenne, à laquelle se superposent des oscillations plus lentes (sur 8-16 ans au Sahel, sur 16-18 ans en Guinée), ainsi qu'une évolution pluri-décennale (Caminade, 2010). L'étude des forçages de surface associés à ces échelles montre que ces forçages résultaient d'abord de l'influence des températures de surface océanique des différents bassins internationaux via des téléconnexions atmosphériques et, au deuxième ordre, des interactions avec la surface continentale (albédo, eau du sol, végétation) qui induisent des effets mémoire et jouent sur la dynamique atmosphérique par des anomalies de subsidence et de jets (Fontaine et *al.*, 2012). Ainsi, les déficits pluviométriques observés en Afrique de l'Ouest ont d'abord été associés à la présence d'eaux anormalement froides dans l'Atlantique nord et anormalement chaudes dans l'Atlantique tropical, entraînant une faible montée des pluies vers le nord (Lamb, 1978). Ensuite, il s'est avéré que cette structure dipolaire Atlantique était associée en partie à une structure globale inter-hémisphérique liée au plus fort réchauffement de l'océan tropical et sud enregistré sur le dernier siècle (Folland et *al.*, 1986). Ainsi, il a été montré que les décennies chaudes sur les parties est-équatoriales de l'Atlantique et du Pacifique ont bien correspondu aux années les plus sèches au Sahel, notamment après les années 1960 (Fontaine et *al.*, 2012). Par ailleurs, Caniaux et *al.*, (2011) ont montré qu'un Golfe de Guinée anormalement chaud maintient les anomalies de convergence du flux d'humidité sur la Basse Côte et limite la pénétration continentale du flux de mousson. Il apparaît donc que le réchauffement climatique a une forte incidence sur la mousson ouest africaine et par conséquent sur la vulnérabilité aux aléas climatiques des populations d'Afrique subsaharienne.

Le quatrième rapport (AR4) du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2007) a alerté la communauté internationale sur l'augmentation des températures de l'atmosphère et des océans, ainsi que sur la probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les sécheresses, l'Afrique étant le continent le plus vulnérable aux changements climatiques. Selon le même rapport, il est très probable que l'augmentation de la température moyenne mondiale observée ces 50 dernières années soit due, en très grande partie, aux émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités humaines. Il est également mentionné dans ce rapport que le

réchauffement des océans provoqué par les activités humaines se poursuivra pendant des siècles, même si l'on parvenait à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre. Au regard de l'influence des températures de surface océanique sur les forçages de surface, un tel bouleversement aura assurément des répercussions sur les précipitations, les ressources hydriques et la production agricole en Afrique de l'Ouest (CGIAR, 2009), même s'il existe encore de nombreuses incertitudes sur les conséquences du réchauffement global sur le climat africain (Fontaine et *al.*, 2012). Les impacts de ces changements sur l'agriculture constituent une contrainte supplémentaire sur un système de production déjà vulnérable à la variabilité climatique actuelle et confronté à une croissance démographique très rapide (Sultan et *al.*, 2012). L'enjeu est tel que malgré l'incertitude sur les projections climatiques, il faut d'ores et déjà réfléchir aux options d'adaptation pour réduire la vulnérabilité de la population africaine à la variabilité et aux changements climatiques (GIEC, 2007 ; Sultan et *al.*, 2012).

L'adaptation aux changements climatiques est une problématique fondamentale à l'échelle planétaire. La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), entrée en vigueur en 1994, est le principal cadre où se prennent les décisions en matière d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle internationale (Baudoin, 2012). Au départ, les mesures prises dans le cadre de la CCNUCC visaient la réduction des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (atténuation). Cependant, depuis les années 2000, au regard du caractère inévitable des changements climatiques (GIEC, 2007) outre l'adoption de mesures d'atténuation, l'adaptation aux changements climatiques a été mise plus en avant que l'atténuation dans les négociations de la CCNUCC. En plus du cadre international, des expériences d'adaptation se mettent également en place à l'échelle locale, notamment en Afrique subsaharienne (Tschakert, 2007 ; Mertz et *al.*, 2009 ; Barbier et *al.*, 2009 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Agossou et *al.*, 2012 ; Kisauzi et *al.*, 2012 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Vissoh et *al.*, 2012 ; Allé et *al.*, 2013a ; Allé et *al.*, 2013b). Ces exemples de pratiques endogènes d'ajustement au climat sont aujourd'hui revalorisés et souvent diffusés, dans le cadre de projets, comme mesures d'adaptation aux changements climatiques.

Toutefois, peu d'études ont analysé la cohérence de ces mesures d'adaptation

avec les changements climatiques déjà observés à l'échelle locale et en particulier en région guinéenne. En outre, la notion d'adaptation est suspectée d'avoir un aspect subjectif qui reflète la perception du risque par l'individu (Bankoff et *al.*, 2003 ; Lallau, 2008 ; O'Brien et *al.*, 2010). Cette perception oriente les mesures d'adaptation que l'individu adopte face au risque. Dans ce contexte, la perception qu'a un individu des changements climatiques peut influencer sa vulnérabilité auxdits changements et la façon dont il va y faire face. Cet aspect subjectif de l'adaptation aux changements climatiques mérite d'être pris en compte afin de comprendre le choix des stratégies d'adaptation adoptées par les populations. Eu égard à cela, les perceptions des changements climatiques sont l'objet d'importantes études en Afrique de l'Ouest (Mertz et *al.*, 2009 ; Barbier et *al.*, 2009 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Vissoh et *al.*, 2012 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Kisauzi et *al.*, 2012 ; Moyo et *al.*, 2012). Bien qu'une grande diversité de perceptions des changements climatiques ait été rapportée, la vérification de la cohérence de ces dernières avec les tendances climatiques à l'échelle locale est encore largement négligée, notamment en région guinéenne. Cette situation soulève quelques questionnements :

- quelle est la cohérence des perceptions que les producteurs agricoles ont des changements climatiques et de leurs impacts agronomiques, avec les observations climatiques ?
- quelle est la pertinence des mesures d'adaptation aux changements climatiques adoptées par les producteurs agricoles au regard de l'évolution du climat ?

Au regard de ces questionnements, l'objectif général de cette thèse est d'analyser la façon dont les producteurs agricoles du plateau d'Allada, en l'occurrence les producteurs de maïs, gèrent les changements climatiques par rapport aux tendances climatiques avérées.

Spécifiquement un double objectif peut être assigné à cette thèse :

1. analyser la cohérence de la perception que les maïsiculteurs ont des changements climatiques par comparaison avec les observations plus scientifiquement organisées ;
2. évaluer la pertinence des mesures d'adaptation adoptées par les maïsiculteurs vis-à-vis desdits changements.

L'étude part des hypothèses suivantes :

1. les perceptions qu'ont les maïsiculteurs des changements climatiques et les observations climatiques sont convergentes.
2. les mesures d'adaptation des maïsiculteurs sont pertinentes vis-à-vis des changements climatiques dans la mesure où leurs perceptions sont en phase avec les observations climatiques.

Pour rendre compte des résultats de la présente étude, le mémoire est structuré de la manière suivante :

Après l'introduction générale qui explique le contexte général, pose la problématique et expose les différents objectifs de l'étude, le mémoire s'articule en six chapitres.

Le **Chapitre 1** définit le cadre conceptuel de l'étude, propose une brève description (i) du cadre géographique du plateau d'Allada, au travers des états de surfaces continentaux (topographie, végétation, hydrographie) et de la saisonnalité ; puis (ii) des données utilisées ainsi que le cadre méthodologique général de la thèse.

Le **Chapitre 2** est une étude diagnostique qui est focalisée sur les changements des précipitations à l'échelle du Sud-Bénin. Ce chapitre introductif sur la climatologie de la région d'étude a permis d'avoir une vision régionale des manifestations pluviométriques, nécessaire pour mieux situer les variations pluviométriques spécifiques à la région d'étude.

Le **Chapitre 3** appréhende les perceptions des chefs d'exploitation agricole (CE) ainsi que leurs mesures d'adaptation face aux changements climatiques sur le plateau d'Allda en se focalisant sur leur âge.

Le **Chapitre 4** analyse la cohérence des perceptions que les CE ont des changements climatiques avec les tendances climatiques observées en mettant en relief les questions d'échelles spatiales à considérer lorsqu'on confronte les perceptions des changements climatiques aux tendances climatiques.

Le **Chapitre 5** s'attache à mettre en lumière le rôle du climat dans l'évolution des rendements agricoles et à analyser les risques liés aux stratégies de gestion des calendriers culturaux en se focalisant sur la culture du maïs. Cela permet

d'analyser l'adéquation des mesures d'adaptation avec les tendances climatiques et de proposer des améliorations techniques en vue de réduire la vulnérabilité de l'agriculture aux aléas climatiques.

Le **chapitre 6** discute ensemble les résultats des chapitres 2 à 5 et fournit des réponses aux questions de recherche formulées dans l'introduction générale.

La conclusion générale présente les principales contributions scientifiques et opérationnelles de la thèse et ouvre des perspectives pour des travaux futurs.

Cadres géographique, conceptuel et méthodologique de l'étude

Selon Daane et *al.* (1992), un même concept peut avoir plusieurs sens, d'où la nécessité de bien définir le concept utilisé et le sens qui lui est donné dans l'étude. Ainsi, le présent chapitre, avant de décrire le cadre géographique et la démarche méthodologique générale de l'étude, en a d'abord défini les principaux concepts.

1.1 Cadre Conceptuel de l'étude

1.1.1 Clarification conceptuelle

Les concepts qui sous-tendent cette étude sont : changements climatiques, perceptions des changements climatiques et adaptation aux changements climatiques.

Changements climatiques

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCCC, 1992) définit ceux-ci comme « les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

Cependant, il n'est pas évident de distinguer les aléas climatiques relatifs à la variabilité climatique naturelle de ceux liés aux changements climatiques du fait des activités humaines. Selon Schipper et Burton (2008) cette distinction ne ressortirait principalement qu'au niveau politique, puisque faire face à la variabilité climatique

a jusqu'à présent été considéré comme une responsabilité nationale, tandis que faire face aux changements climatiques relève d'une responsabilité mondiale.

Gardant à l'esprit cette distinction difficile entre variabilité et changements climatiques, en particulier dans le contexte africain (Al Hamndou et Requier-Desjardins, 2008), la notion de changements climatiques qui a été utilisée dans cette étude fait référence à tout changement climatique dans le temps, qu'il provienne de la variabilité naturelle ou qu'il soit le résultat de l'activité humaine.

Perception des changements climatiques

La notion de perception, dans le contexte de la présente étude, fait référence à un événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne de façon consciente.

En ce sens, Lalande (1985) estime que la perception est l'acte par lequel un individu, organisant ses sensations présentes, les interprétant et les complétant par des images et des souvenirs, se représente un objet qu'il juge spontanément distinct de lui, réel et actuellement connu de lui.

Dans un contexte climatique, Ouédraogo et *al.* (2010) indiquent que la notion de perception des changements climatiques se réfère au rapport des agriculteurs avec leur environnement qui est nécessairement subordonné à l'ensemble des manifestations apparentes du climat et à un ensemble d'instruments de portée cognitive qui leur permettent de l'appréhender.

En définitive, la perception peut désigner une interprétation d'un stimulus sensoriel sur la base de nos connaissances antérieures. Dans le cadre de cette thèse, la perception des changements climatiques désigne l'interprétation que les producteurs font des stimuli climatiques actuels (au moment de l'enquête) par rapport à ceux antérieurs.

Adaptation aux changements climatiques

Elle est définie comme l'ajustement des systèmes naturels et humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs, ou à leurs effets, afin d'atténuer les

effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques (GIEC, 2001).

La présente étude étant basée sur les données climatiques historiques, les ajustements aux conditions climatiques futures n'ont pas été pris en compte. Ainsi l'adaptation aux changements climatiques désigne dans cette étude l'ajustement des systèmes naturels et humains en réponse à des stimuli climatiques avérés ou à leurs effets, afin d'en atténuer les conséquences néfastes ou d'en exploiter les opportunités.

1.1.2 Schéma conceptuel de l'étude

La figure 1.1 fait ressortir les différents liens qui existent entre les concepts clés de l'étude. Ces liens peuvent être interprétés tel qu'il suit : *les modifications climatiques perturbent le déroulement des indicateurs environnementaux (migration d'oiseaux et d'insectes, période et durée des feuillaisons et floraisons de certains arbres, inondation, sécheresse, etc...).* Ces perturbations constituent des repères de changements climatiques pour les producteurs et déterminent leur perception de l'évolution du climat. Sur la base de leur perception des changements climatiques et selon leur niveau socio-économique, les producteurs font évoluer des stratégies endogènes existantes construites au fil du temps et adoptent de nouvelles mesures d'adaptation (exogènes) introduites par des ONG ou des services de promotion agricole ou encore sur la base de leurs savoirs locaux. Cependant, certaines mesures d'adaptation peuvent exercer des pressions supplémentaires sur l'environnement et dégrader davantage le climat. Cette carte conceptuelle montre bien que la perception est un facteur déterminant dans l'adoption des mesures d'adaptation aux changements climatiques. En effet, la notion d'adaptation est emprunte d'un aspect subjectif car elle dépend en partie des choix de l'individu de mobiliser ce qui est à sa portée pour faire face au risque, choix liés à la façon dont il perçoit le risque (Gaillard, 2010). Il apparaît essentiel donc de vérifier au préalable la cohérence des perceptions vis-à-vis des tendances climatiques si l'on veut mieux comprendre l'adoption des mesures d'adaptation par rapport aux tendances climatiques.

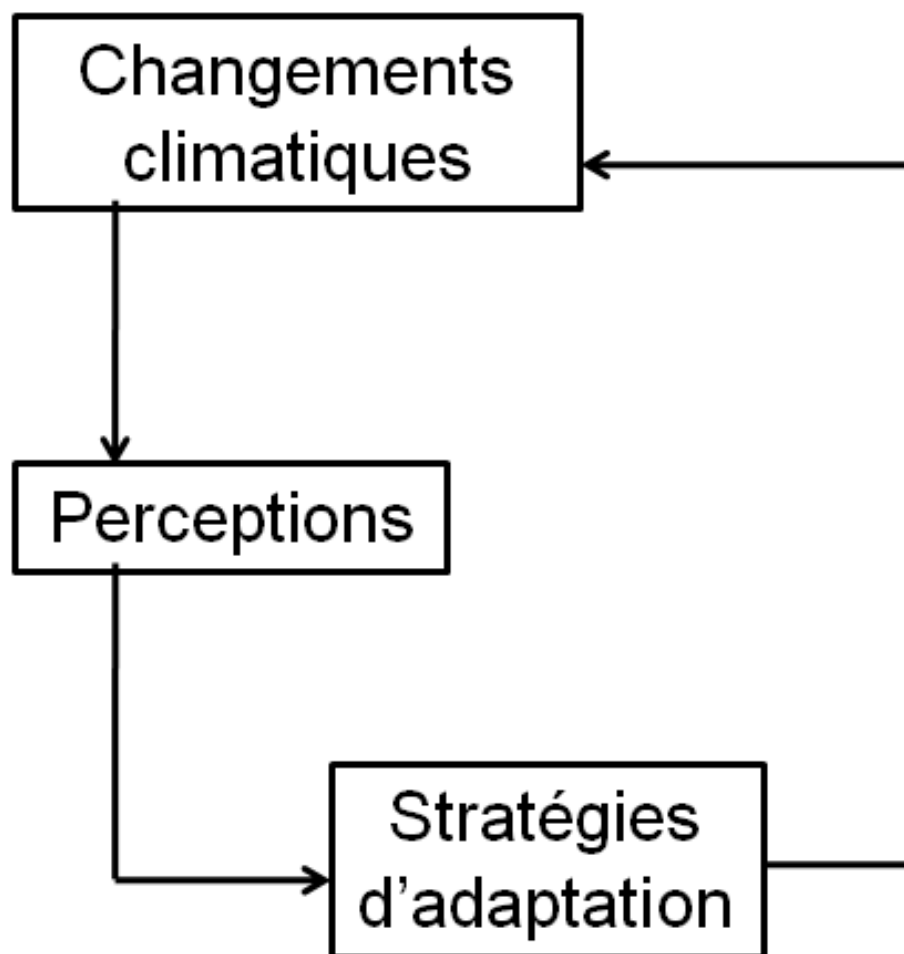


FIGURE 1.1 – Shéma conceptuel montrant les interactions entre changements climatiques, perceptions et stratégies d'adaptation

1.2 Zone d'étude

1.2.1 Cadre géographique

La zone d'étude est le plateau d'Allada (Figure 1.2). Cette région d'une superficie d'environ 3000 km², soit 2.6% du territoire national, est située à une latitude comprise entre 6.2 et 7°N et à une longitude variant entre 1.5°E et 2.3°E. L'altitude moyenne est de 100 mètres, mais elle peut atteindre 160 mètres à Houègbo au Nord (Houndénou, 2006). La plaine littorale forme sa limite au Sud. Outre le département du Mono, le lac Ahémé, les fleuves Couffo et Aho constituent les limites naturelles de sa frontière Ouest. Le département du Zou et la dépression de la Lama le limitent au Nord. A l'Est, il est limité par la vallée de l'Ouémé, le lac Nokoué et

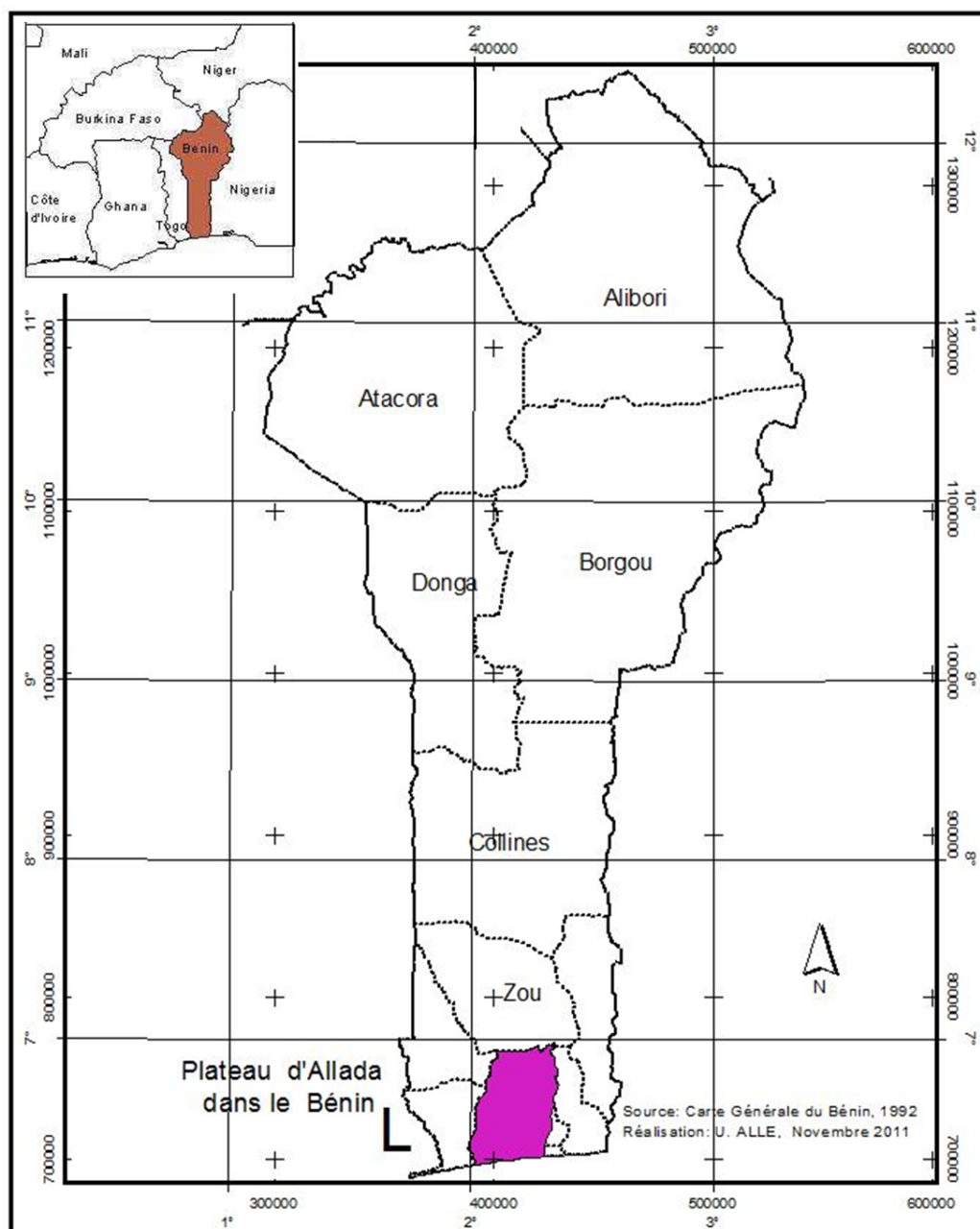


FIGURE 1.2 – Localisation du plateau d'Allada

le département du Littoral (Boukari, 1998). Ces lacs et fleuves qui ceinturent le plateau d'Allada en constituent l'essentiel de son réseau hydrographique.

La majeure partie du bassin sédimentaire côtier auquel appartient le plateau d'Allada est recouverte de sols ferrallitiques appelés « terre de barre ». La présence de ces sols est étroitement liée à celle d'un matériau particulier, le Continental Terminal (Poss, 1991). Généralement, les teneurs en argile de ces sols varient entre

5 et 15% en surface et entre 50 et 55% au delà de 60 cm de profondeur (Azontondé, 1991). Quant à l'indice d'érodibilité, il varie de 0.05 en surface à 0.1 en profondeur, alors que la perméabilité diminue depuis les horizons superficiels où elle varie entre 5 et 8 cm/h jusqu'aux horizons profonds atteignant 3 à 6 cm/h. En outre, ces sols ont une réserve utile comprise entre 40 et 50 mm à 30 cm de profondeur et entre 60 et 70 mm à 60 cm de profondeur (Boukari, 1998). Par ailleurs, dans les zones littorale et alluviale on rencontre des sols soit hydromorphes, soit halomorphes lessivés à alcalis, soit des sols peu évolués sur sables littoraux ou alluviaux (Boukari, 1998).

Le système agro forestier est globalement à palmier à huile avec par endroits des reliques de forêts semi-décidues qui, ainsi, soulignent un état de déforestation avancé sur la zone d'étude. Ces forêts sont essentiellement constituées de *Trilpochiton scleroxylon*, *Terminalia superba*, *Terminalia capata*, *Ceiba pentendra*, *Cola cordofilia*, *Chorophora excelsa*, *Antaris africana* (Houndénou, 2006). Quant aux rives saumâtres, elles sont caractérisées par *Paspalum vaginatum*, *Typha australis*, *Acrostichum aureum* alors que les rives d'eau douce sont marquées par *Echinochloa pyramidalis*, *Vitiveria nigritana*, *Phragmites australis*, *Vossia cuspidata*, *Sesbania pubescens*, et *Mitragyna ciliata* (Boukari, 1998).

Le contexte climatique du plateau d'Allada est influencé par le double passage de la zone de convergence intertropicale aux latitudes comprises entre 5°N et 10°N (Sultan et Janicot, 2003). En conséquence, le régime pluviométrique est bimodal (Figure 1.3) avec deux maxima en juin (9 mm/j) et octobre (5 mm/j).

La dynamique saisonnière des températures journalières présente également une allure bimodale (Figure 1.4) avec deux maxima en mars (28°C) et en novembre (28°C). L'écart entre le mois le plus chaud (mars) et le mois le plus frais (août) est de 3°C. Le Barbé et al. (1993) ont également trouvé cette valeur et ont montré qu'elle croît du sud au nord du pays, passant de 3°C à 9°C à la latitude de 12°N.

L'évolution des vitesses diurnes de vents à deux mètres du sol (Figure 1.5) est également caractérisée par un régime bimodal. Les vents sont plus forts en mars (4.7 m/s) et août (5.3 m/s). De façon générale, les vents dominants sur le littoral, au regard de leur fréquence, sont : SW (64%), WSW (16%) et SSW (14%), avec des vitesses moyennes respectives de 4.4 m/s, 6 m/s et 3.6 m/s (Oyédé, 1991 ; Gbaguidi et al., 2011).

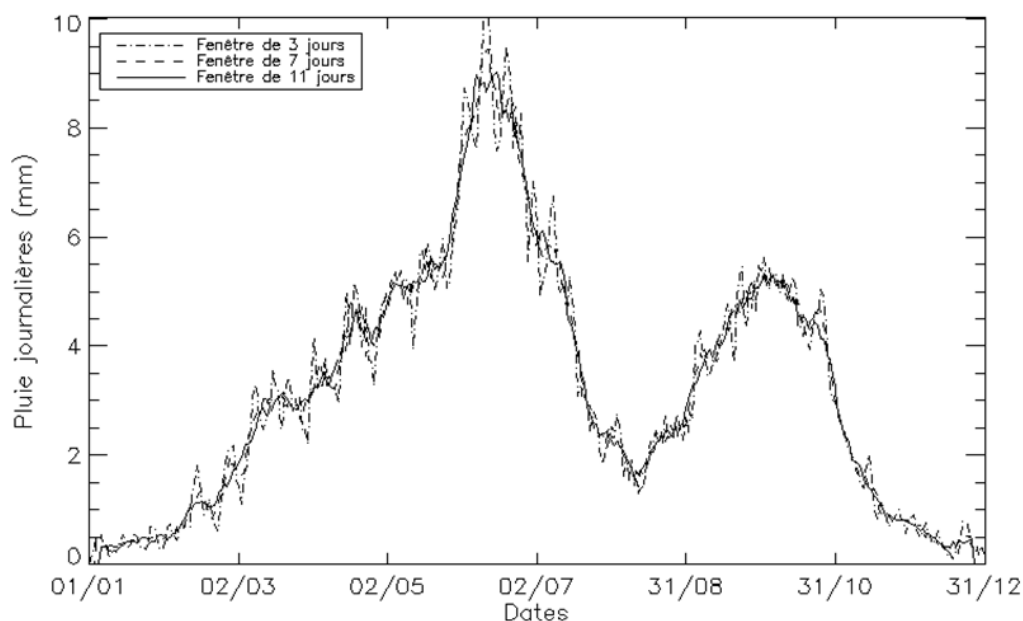


FIGURE 1.3 – Cycle saisonnier moyen des précipitations sur le Sud du Bénin entre 1951-2010. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 3 jours, 7 jours et 11 jours.

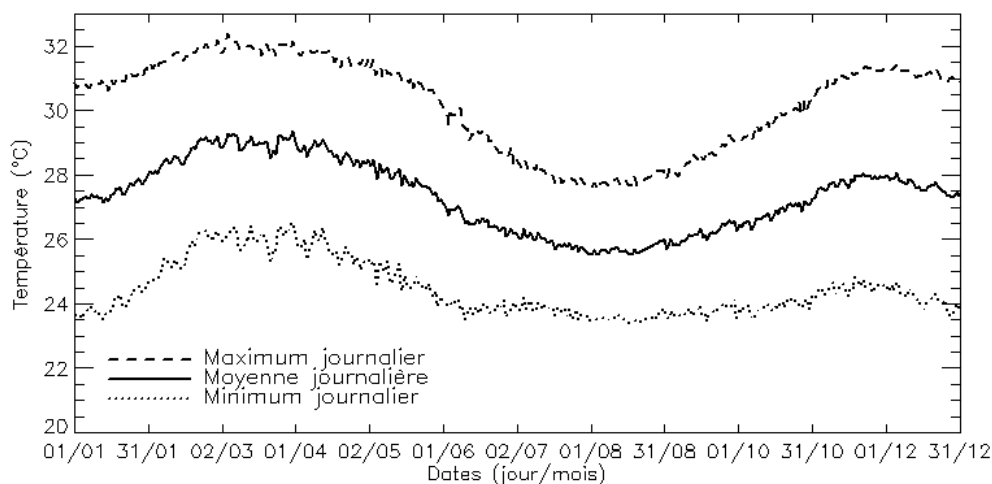


FIGURE 1.4 – Cycle saisonnier moyen des températures à la station synoptique de Cotonou entre 1953-2010.

1.2.2 Cadre socioéconomique

La superficie du département de l'Atlantique est constituée à près de 95% par le plateau d'Allada. La plupart des données démographiques présentées ici sont

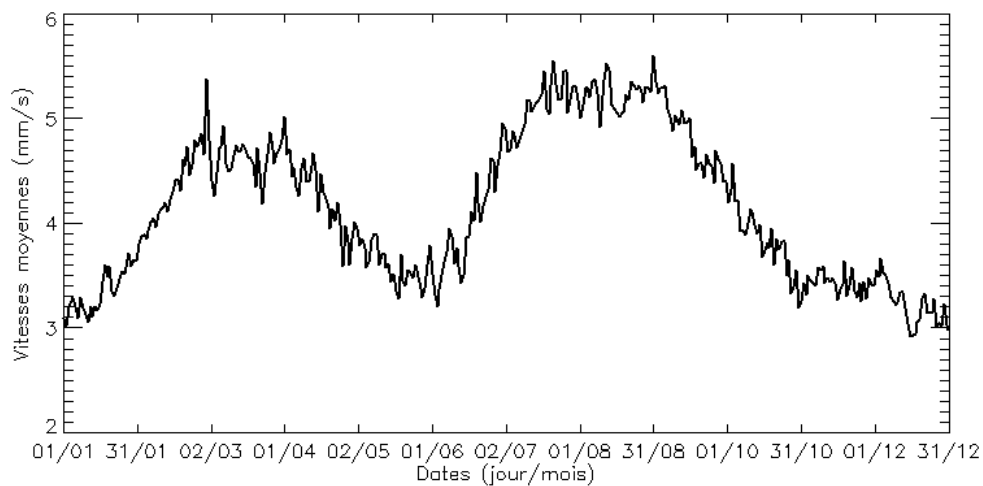


FIGURE 1.5 – Cycle saisonnier moyen des vitesses moyennes journalières de vents à la station synoptique de Cotonou entre 1961 et 2010.

donc relatives au département de l'Atlantique. Ces données proviennent en partie des résultats provisoires du recensement général de la population et de l'habitat de 2013 (INSAE, 2013).

La population du département de l'Atlantique est estimée en 2013 à 1 396 548 habitants, soit 14% de la population nationale, avec 51% de femmes. La densité moyenne de cette population est d'environ 432 hbts/km², constituant de fait la troisième plus dense population du Bénin derrière celles de l'Ouémé (856 hbts/km²) et du Littoral (8593 hbts/km²). L'âge médian est de 16.8 ans, avec près de 95% de la population ayant moins de 60 ans (INSAE, 2002). La population est essentiellement rurale (62%) (INSAE, 2002). La croissance démographique du département de l'Atlantique est relativement élevée passant de 2.68% sur 1979-1992 à 4.23% sur 1992-2002 puis à 5.06% sur 2002-2013.

La région d'étude est essentiellement peuplée de groupes socio-culturels dérivés de l'aire culturelle Adja-Tado, originaire de Tado au Togo. Cette ville est considérée comme le point de dispersion des Adja. Il s'agit notamment des Watchi, des Ayizo, des Xweda, des Fon, des Tolli (Houndénou, 2006). Les principales activités économiques de ces populations sont orientées vers l'agriculture et la pêche traditionnelle qui est souvent pratiquée sur les rives lagunaires. La principale production vivrière sur le plateau d'Allada et plus généralement au Sud-Bénin est le

maïs. Il est rarement conduit en culture pure. Le maïs est généralement associé au manioc. Les élevages étant essentiellement ovin, caprin, avicole et porcin, l'agriculture attelée est quasi-inexistante et la fumure du maïs extrêmement rare dans la région d'étude. La technique la plus courante dans cette région est l'agriculture itinérante sur brûlis. Elle implique une rotation maïs, manioc, niébé ou arachide avec une courte, voire inexistante, période de jachère (Vissoh et *al.*, 2004). La culture de l'ananas connaît, depuis quelques décennies, un essor notable dans la région.

Outre le fait que l'agriculture soit essentiellement pluviale, donc fortement dépendante des conditions météorologiques, elle est caractérisée par l'inexistence de schéma clair de diffusion semencière (Baco et *al.*, 2007). Par ailleurs, les pertes post-récoltes peuvent atteindre 50% après seulement 6 mois de stockage ; cela est dû à la multiplication rapide des ravageurs (Adda et *al.*, 2002). En ce qui concerne la pêche, elle se fait, soit par prélèvement direct via divers filets, soit par la technique de l'« acadja » qui consiste à implanter des amas de branchages dans les eaux peu profondes pour servir de pièges aux poisson. Cette technique, pratiquée sur le lac Nokoué, est l'une des méthodes endogènes d'exploitation halieutiques les plus rentables au monde (Le Barbé et *al.*, 1993). Cependant, elle peut modifier les conditions hydrodynamiques, physico-chimiques et écologiques des lacs.

1.3 Méthodologique générale de l'étude

Les différentes données et méthodes utilisées dans cette thèse sont davantage détaillées au niveau des chapitres spécifiques. La présente section expose de façon globale l'ensemble des données et la méthodologie utilisées pour répondre aux enjeux de cette thèse. Il s'agit des données climatiques, socioéconomiques et agro-nomiques.

1.3.1 Données climatiques

Les données climatiques regroupent les données journalières de précipitations, de températures, de vitesses de vents, d'insolations et d'humidités relatives. Elles proviennent du réseau d'observation du climat de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les premières stations de ce réseau ont été installées sur la

région d'étude depuis 1921. Cependant, c'est dans les années 1950 que ce réseau s'est densifié, passant d'un taux d'installation de 43% en 1921 à 75% en 1955. La nécessité d'avoir un bon compromis entre le nombre de stations et la longueur des séries climatiques à utiliser a ainsi conduit au choix de la période 1951-2010 comme période de référence pour cette étude.

Sur cette base, nous avons, dans un premier temps, retenu 17 stations qui ont été installées sur et à proximité de la zone d'étude avant le 1^{er} janvier 1951, à l'exception de la station synoptique de Cotonou installée en 1952. Cette dernière a été retenue compte tenu du fait qu'elle est la seule station au Sud-Bénin où les données climatiques telles que les températures, les vitesses de vents, les insolationes et les humidités relatives sont régulièrement enregistrées depuis les années 1950.

Dans un deuxième temps, parmi les 17 stations précédemment sélectionnées, nous en avons éliminé 3 sur la base de leur taux de lacunes (années manquantes) qui étaient supérieurs à 10%, ce qui est communément utilisé comme une valeur seuil acceptable (Romero et *al.*, 1998). Notons que pour cette étude, une année est déclarée manquante si la station présente des données manquantes, d'une part entre mars et juillet et, d'autre part, entre septembre et novembre. Le choix de ces périodes se justifie par le fait que la somme de leurs cumuls pluviométriques explique entre 88 et 95% de la variance du cumul annuel. En définitive, 14 stations du réseau de la DMN ont été retenues pour cette étude. La figure 1.6 indique la localisation des 14 stations retenues et le tableau 1.1 renseigne sur le nombre d'années manquantes pour chacune d'elles sur la période de référence (1951-2010).

Dans le contexte d'une estimation régionale des phénomènes climatiques en premier lieu pluviométriques, il est apparu essentiel de s'assurer que l'échantillon formé par les 14 stations est un ensemble homogène. Cette vérification a été basée sur l'analyse des séries annuelles de cumuls pluviométriques. Ainsi, en partant des 14 séries annuelles de cumuls pluviométriques (14 stations), nous avons réalisé dans un premier temps le test de Levene (Howard, 1960) de comparaison des variances qui nous a permis de conclure que les variances des cumuls annuels des 14 stations sont identiques. Dans un deuxième temps, en guise de confirmation, nous avons réalisé le test d'homogénéité de Kruskal-Wallis (Kruskal-Wallis, 1952) qui nous a permis de confirmer que les 14 stations formaient un échantillon homogène.

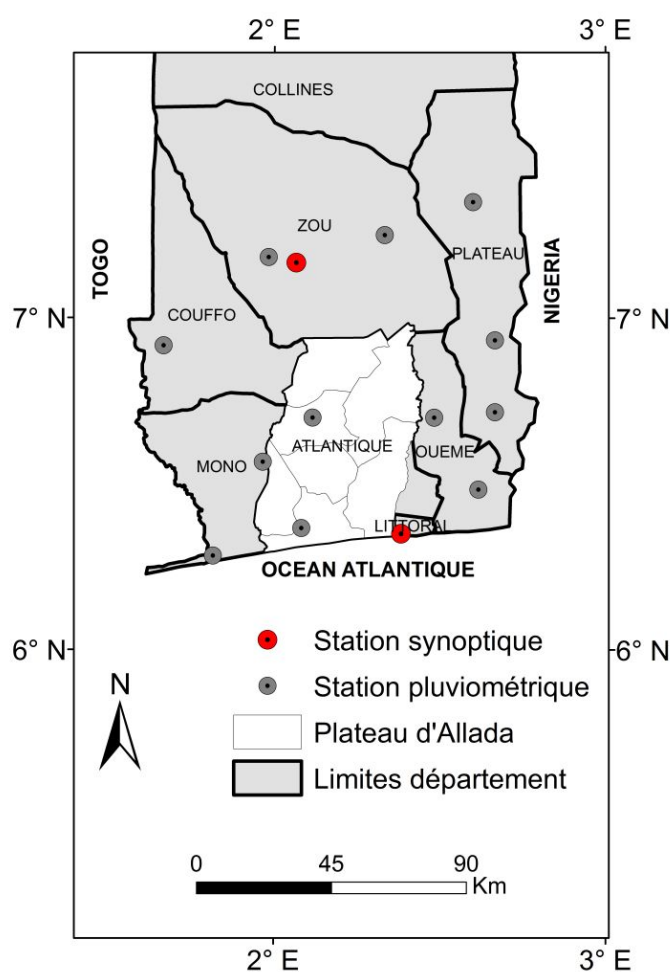


FIGURE 1.6 – Réseau des 14 stations climatiques sélectionnées.

1.3.2 Données socioéconomiques

Ces données sont relatives aux caractéristiques socioéconomiques, perceptions des changements climatiques et mesures d'adaptation des exploitants agricoles enquêtés. L'unité d'échantillonnage est l'exploitation agricole, car c'est à ce niveau que se prennent les décisions techniques et de gestion relatives à l'adaptation aux changements climatiques (Ouédraogo *et al.*, 2010). Les données ont été collectées en 2011 en deux étapes principales.

La première a consisté en une étude exploratoire. C'est au cours de cette phase que nous avons pris contact et organisé des entretiens de groupe avec les chefs de villages, les agents de promotion agricole et les personnes ressources des villages (Agents de l'Etat à la retraite, Anciens instituteurs, personnes âgées, anciens griots,

TABLE 1.1 – Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses

Stations	Lat (°C)	Long (°C)	Instal	Manquant	Cumul (mm)	Jp
Kétou	7.350	2.600	1950	2	917 (197)	59 (10)
Zagnanado	7.250	2.333	1921	2	906 (251)	58 (10)
Abomey	7.183	1.983	1921	5	924 (184)	72 (17)
Bohicon	7.166	2.066	1940	0	961 (199)	82 (11)
Pobè	6.933	2.666	1921	1	1039 (207)	89 (12)
Applahoué	6.916	1.666	1921	1	935 (208)	59 (8)
Sakété	6.716	2.666	1921	3	1020 (245)	61 (14)
Niaouli	6.700	2.116	1941	0	1010 (229)	70 (11)
Bopa	6.566	1.966	1921	3	827 (221)	50 (10)
Porto-Novo	6.483	2.616	1921	2	1162 (285)	67 (19)
Adjohoun	6.420	2.290	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Ouidah	6.366	2.001	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Cotonou	6.350	2.383	1952	2	1168 (316)	83 (11)
Grand-Popo	6.283	1.816	1921	2	864 (236)	45 (9)

Légende : Lat = latitude (en degré décimal); Long = longitude (en degré décimal); Instal= date d'installation des stations; Manquant = nombre d'années manquantes entre 1951 et 2010; Cumul= cumul pluviométrique moyen (1951-2010) annuel en mm; Jp = nombre de jours pluvieux (> 1mm)

etc...)). Le guide d'entretien a comporté des questions ouvertes et semi-ouvertes, permettant de recueillir et de hiérarchiser les opinions des groupes. Cette première étape a permis d'obtenir la désignation en langue locale des concepts clés caractérisant le climat et le calendrier agricole. Au cours de cette phase, nous avons également recueilli les repères climatiques au travers desquels les agriculteurs appréhendent l'évolution du climat (feuillaison ou floraison des arbres, migration d'oiseaux, occurrence de vers de terre ou de rongeurs, etc...). Ces informations ont servi à l'élaboration du questionnaire individuel pour la deuxième étape.

La deuxième étape a consisté en l'administration du questionnaire individuel.

Il portait sur les caractéristiques socioéconomiques de l'exploitation agricole, sur la perception des changements climatiques suivant et sur l'adoption ou non de mesures d'adaptation. Le questionnaire individuel a été administré par des agents de vulgarisation agricole qui, en plus d'avoir assisté aux entretiens de groupe, ont été formés à l'administration dudit questionnaire. Ces agents de promotion agricole qui sont établis dans la localité entretiennent une relation de confiance avec les producteurs et parlent la langue locale. Toutefois, notre présence sur le terrain a permis de nous assurer de l'effectivité et du bon déroulement de l'enquête.

Le choix des exploitations agricoles à enquêter a été fait à partir d'un échantillonnage probabiliste basé sur un sondage à deux niveaux. Le premier niveau a consisté en la sélection des unités primaires (villages) et le second niveau a consisté en la sélection des exploitations agricoles au sein des unités primaires. Les villages ont été choisis avec une probabilité proportionnelle à la taille (PPT) de leur population agricole et les exploitations ont été choisies au hasard dans chaque village. Dans le cadre de cette étude, la liste des villages a été constituée sur la base du cahier des villages et quartiers de ville du département de l'Atlantique. Ce cahier a été élaboré par l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Économique lors du troisième recensement général de la population et de l'habitation en février 2002. Au total, 201 exploitations agricoles réparties sur 67 villages à raison de trois exploitations par village ont été enquêtées. La figure 1.7 présente la localisation des villages enquêtés.

1.3.3 Données agronomiques

Elles proviennent d'essais agronomiques mis en place en 2012 au Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRAPP) de Pobè (6.56°N ; 2.40°E). Il s'agit des données de biomasse aérienne, de phénologie, de surface foliaire et de rendement en grains de la variété de maïs DMR-ESR-W, cette variété de 90 jours non photopériodique étant largement adoptée par les agriculteurs de la région d'étude. Deux types d'essais avaient été mis en place : un essai irrigué et un essai pluvial.

Le dispositif expérimental de l'essai irrigué (Figure 1.8) était constitué en blocs aléatoires complets avec trois répétitions et une date de semis : le 9 mai. Chaque bloc mesurait 12 m × 10 m, incluant un carré de rendement (4 m × 4 m) au centre, des

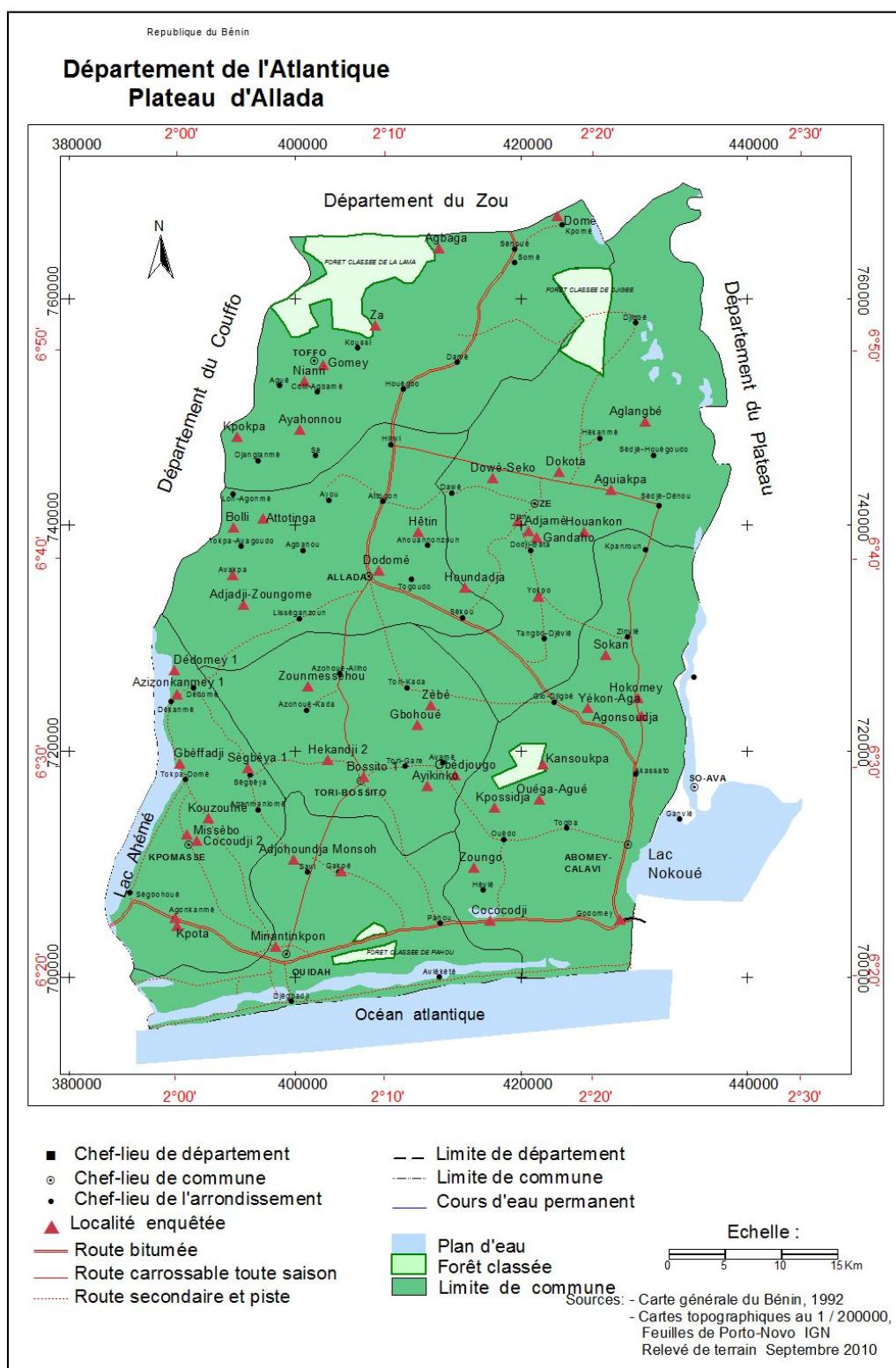


FIGURE 1.7 – Localisation des villages étudiés

carrés de mesures destructives (biomasse aérienne, surface foliaire) et des carrés de suivis phénologiques (dates des stades phénologiques). La culture a bénéficié d'une irrigation d'appoint de cinq mm/j (Figure 1.9), cette dose correspondant au maximum de l'évapotranspiration journalière maximale (ETM) durant le cycle de développement de la variété de maïs considérée. La densité de semis est de 0.80 m × 0.40 m, soit 62 500 plants par hectare à raison de deux plants par poquets. La dose de fertilisation a été de 100 Kg/ha de NPK et 50 kg/ha d'urée. Le NPK a été apporté aux plants 14 jours après le semis et l'Urée deux semaines plus tard.

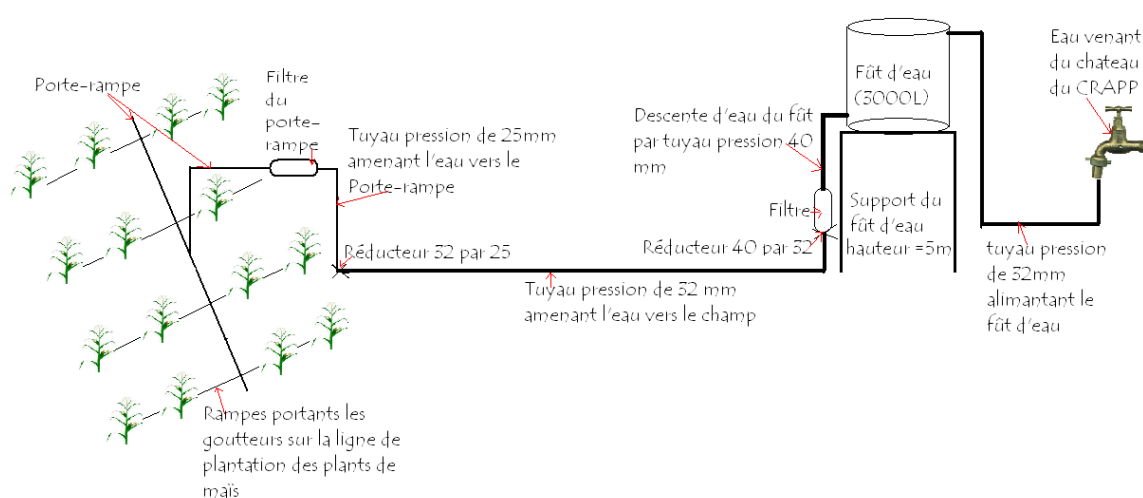


FIGURE 1.8 – Schéma du dispositif expérimental de l'essai irrigué.

Quant à l'essai pluvial, le dispositif expérimental (Figure 1.10) était constitué en bloc aléatoire complet avec trois répétitions et trois dates de semis : 14 avril, 9 mai et 2 juin. La culture était strictement pluviale sans aucune irrigation d'appoint. Le choix de ces différentes dates et la restriction à une culture strictement pluviale avaient pour objectif d'obtenir des situations contrastées impactant les processus de développement et de croissance de la culture du maïs. Les dimensions des blocs, les mesures effectuées, la densité et la fertilisation du sol étaient identiques à celles de l'essai irrigué.



FIGURE 1.9 – Expérimentation agricole en conditions d’approvisionnement en eau (irrigation à 5 mm/j par goutte à goutte) et de fertilité du sol (100 Kg/ha de NPK et 50 kg/ha d’urée) non limitantes.

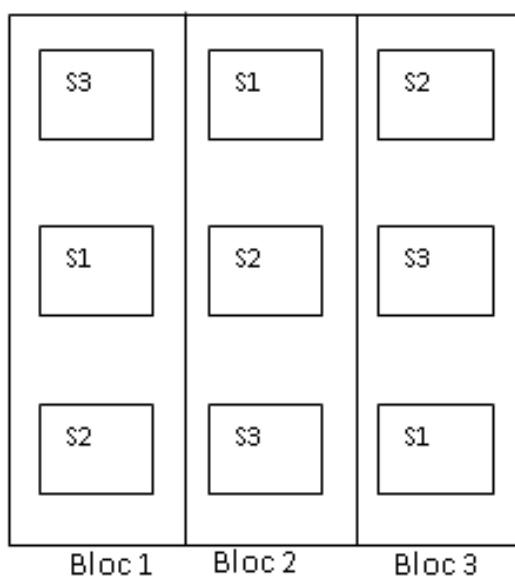


FIGURE 1.10 – Schéma du dispositif expérimental de l’essai pluvial.
Légende : S1= semis du 14 avril ; S2= semis du 09 mai ; S3= semis du 2 juin ; les rectangles à l’intérieur des blocs représentent les parcelles élémentaires 12 m x 10 m.

Les stades phénologiques observés sont : (i) la levée, (ii) la montaison, (iii) la floraison, (iv) l'épiaison, (v) la maturité laiteuse, (vi) la maturité cireuse et (vii) la maturité complète. Dans chaque parcelle, cinq poquets de deux plants chacun ont été sélectionnés au hasard sur une même ligne pour les observations phénologiques. Ces observations ont été faites tous les trois jours. La date de début du stade phénologique est prise comme la date à laquelle six plants sur les dix sélectionnés ont atteint le stade phénologique en question.

Le suivi de l'accumulation de biomasse aérienne a été effectué par des prélèvements destructifs des plants tous les 20 jours environ. A chaque date, cinq poquets de deux plants chacun étaient sélectionnés au hasard dans toute la parcelle (Figure 1.11), sauf dans le carré de rendement et à proximité de la ligne de suivi phénologique pour ne pas modifier leurs densités. Les opérations ont consisté à chaque fois à (Figure 1.12) :

- couper les 10 plants sélectionnés au hasard à la hauteur du plateau de tallage (Figure 1.11) ;
- séparer les tiges, les feuilles vertes (2/3 de la feuille est verte), des feuilles sénescents, les épis, les panicules mâles, les soies et les spathes (Figure 1.12) ;
- peser séparément (poids frais) les tiges, les feuilles vertes, les feuilles sénescents, les épis, les panicules mâles, les soies et les spathes ;
- prélever et à peser séparément (poids frais) des aliquotes des tiges, des feuilles vertes, des feuilles sénescents, des épis, des panicules mâles, des soies et des spathes ;
- sécher les aliquotes au soleil puis à l'étuve pendant 72 heures à 65°C ;
- peser séparément le poids sec des aliquotes après séchage ;
- calculer séparément le poids sec total des tiges, des feuilles vertes, des feuilles sénescents, des épis, des panicules mâles, des soies et des spathes suivant l'équation 1.3.1.

$$PS_{tot} = \frac{PS_{aliq} \times PF_{tot}}{PF_{aliq}} \quad (1.3.1)$$

Avec :

PS_{tot} = poids sec total ; PS_{aliq} = poids sec aliquote ; PF_{tot} = poids frais total ; PF_{aliq} = poids frais aliquote.



FIGURE 1.11 – Plants prélevés.



FIGURE 1.12 – Séparation des tiges, des feuilles vertes (2/3 de la feuille est verte), des feuilles sénescentes, des épis, des panicules mâles, des soies et des spathes.

La mesure de la surface foliaire a été faite simultanément avec celle de la biomasse aérienne. Après avoir pesé l'aliquote des feuilles vertes, ces dernières ont été passées au planimètre (Delta-T MK2 : Type AMS) afin de déterminer la surface foliaire de l'aliquote. Ensuite la relation 1.3.2 a permis d'estimer la surface foliaire

totale des feuilles vertes des dix plants précédemment prélevés pour la biomasse aérienne. La surface massique des feuilles (SLA) a ensuite été calculée en faisant le rapport entre la surface et le poids sec des feuilles.

$$SF_{tot} = \frac{SF_{aliq} \times PF_{tot}}{PF_{aliq}} \quad (1.3.2)$$

Avec :

SF_{tot} = surface foliaire total ; SF_{aliq} = surface foliaire aliquote ; PF_{tot} = poids frais total ; PF_{aliq} = poids frais aliquote.

La mesure du rendement en grains a consisté en la récolte de tous les épis dans le carré de rendement. Ces épis ont ensuite été battus et les grains ont été séparés des rafles pour la détermination de leur poids (rendement en grains). Ensuite cinq échantillons de mille grains ont été pesés et le poids moyen d'un grain a été déterminé en divisant par mille le poids moyen des cinq échantillons de mille grains.

1.3.4 Démarche méthodologique

La figure 1.13 résume la démarche méthodologique adoptée pour atteindre les objectifs de l'étude. Cette démarche se décline en deux étapes principales :

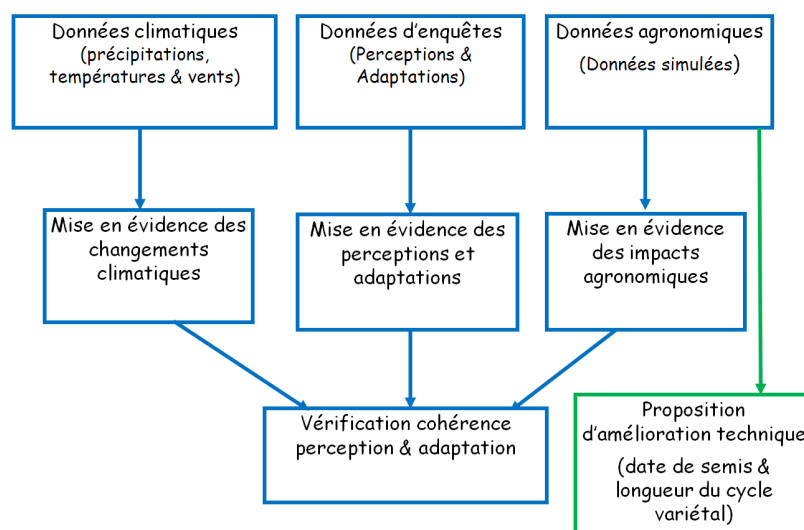


FIGURE 1.13 – Démarche méthodologique.

- La première étape a consisté en l'analyse de la cohérence de la perception qu'ont les maïsiculteurs des changements climatiques vis-à-vis des tendances climatiques avérées. Pour ce faire, nous avons confronté les résultats d'études climatiques et de simulations agronomiques aux résultats d'études de perceptions. Cela nous a permis de montrer les concordances et les divergences entre les perceptions des maïsiculteurs et les résultats d'analyses climatiques et agronomiques en termes de changements des précipitations, des températures, des vitesses des vents et des impacts des aléas climatiques sur les rendements agricoles, notamment ceux du maïs. A ce sujet, nous avons utilisé un certain nombre de statistiques et d'outils de modélisation agronomique tels que les anomalies centrées réduites, les chaînes de Markov, le test de Khi-2, le modèle SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques Version H). Ces différents statistiques et outils ont été décrits seulement au niveau des chapitres spécifiques pour éviter des effets de redondance.
- Au cours de la deuxième étape, nous avons évalué la pertinence des mesures d'adaptation adoptées par les maïsiculteurs vis-à-vis des tendances climatiques passées. A cet effet, nous avons, dans un premier temps, analysé les mesures d'adaptation adoptées par les maïsiculteurs au regard de leurs perceptions des changements climatiques. Dans un deuxième temps, nous avons confronté les résultats de simulations agronomiques, basées sur les conditions climatiques passées, aux mesures d'adaptation adoptées. Cela nous a permis de voir si ces deux types de données sont concordantes ou non, particulièrement en termes de période de semis et d'adaptation variétale. Pour ce faire nous avons eu recours aux méthodes d'analyse multivariées (ACP) et aux outils de modélisations agronomiques (SARRA-H). D'amples détails concernant ces méthodes et outils sont fournis dans les chapitres spécifiques.

Conclusion de chapitre

Le plateau d'Allada est une région fortement peuplée avec une moyenne de 432 hbts/km² et un taux de croissance de la population de plus de 5%. La majorité (62%) de cette population étant rurale, elle dépend essentiellement de l'agriculture

pluviale. Cette forte démographie et la dépendance à l'agriculture pluviale rendent les populations rurales de cette région particulièrement vulnérables aux aléas climatiques. C'est donc à juste titre que nous nous interrogeons sur les perceptions qu'elles ont et la gestion qu'elles font en termes de mesures d'adaptation des changements climatiques. Ainsi, la démarche méthodologique générale de cette thèse est basée sur l'analyse de la cohérence des perceptions des changements climatiques et de la pertinence des adaptations vis-à-vis des observations climatiques.

Evolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010

Ce chapitre a été publié tel qu'il suit :

Allé CSUY, Afouda AA, Agbossou KE, Guibert H, 2013. Evolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010. *American Journal of Scientific Research* 94 : 55-68.

Evolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010

Résumé

Cette étude a analysé l'évolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons pluvieuses au sud-Bénin entre 1951 et 2010. A cet effet, les enregistrements pluviométriques journaliers de 14 stations ont été utilisés. La période d'étude a été scindée en trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Les tendances entre les sous-périodes montrent que la sous-période intermédiaire (1971-1990) est la plus sèche. Après 1990, on note un retour de conditions plus humides, mais cette dernière sous-période (1991-2010) demeure déficitaire au regard de la sous-période la plus humide (1951-1970). Toutefois, la première et la deuxième saison des pluies ne sont pas affectées de la même manière par les forçages atmosphériques. Après 1990, alors que la qualité de la deuxième saison des pluies redevenait comparable à celle de 1951-1970, la première saison des pluies est restée précaire, comparable à celle de 1971-1990. En outre, après 1970, la première saison des pluies a raccourci du fait de son retard, alors que la deuxième saison des pluies s'est allongée en raison de la précocité de son démarrage. Ces évolutions dans la durée des saisons et dans leur qualité ouvrent des questionnements importants dans le cadre de l'adaptation des stratégies agricoles aux aléas climatiques.

Mots-Clefs : Descripteurs intrasaisonniers, Saisons des pluies, Séquences sèches, Jours pluvieux, Chaînes de Markov, Afrique

2.1 Introduction

La gamme de variabilités climatiques, allant de l'échelle intrasaisonnière (supérieure à 10 jours) aux échelles décennale et pluri-décennale, impacte les écosystèmes et les activités humaines, particulièrement sur le continent africain où la dépendance des sociétés aux aléas naturels, en premier lieu pluviométriques, est la plus forte (Fontaine *et al.*, 2012). Cette situation de vulnérabilité s'illustre par le fait que depuis les années 1970, les variations du climat ont contribué aux plus grandes famines

ayant nécessité un recours à l'aide alimentaire internationale (Dilley et *al.*, 2005). Dans ce contexte, comprendre et anticiper les fluctuations climatiques constitue un enjeu majeur pour le développement économique et la sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne (Sultan et *al.*, 2012).

A cet effet, l'échelle intrasaisonnière doit être considérée comme une échelle clé puisque les rendements agricoles sont davantage liés aux fluctuations intrasaisonnières des précipitations qu'au simple cumul annuel (Ingram et *al.*, 2002). Les récentes études sur la variabilité intrasaisonnière des précipitations en Afrique de l'Ouest ont généralement analysé l'échelle régionale (Sultan et Janicot, 2000 ; Louvet et *al.*, 2003 ; Fontaine et *al.*, 2008 ; Mounier et *al.*, 2008 ; Pohl et *al.*, 2009). Par ailleurs, ces études ont préférentiellement été menées à partir de données en points de grille et filtrées pour s'affranchir de la variabilité journalière. En revanche, l'analyse des caractéristiques intrinsèques des saisons des pluies à l'échelle locale est encore rare (Usman et Reason, 2004 ; Camberlin et *al.*, 2009), notamment en région guinéenne.

Dans ce contexte, il est apparu essentiel d'analyser davantage la variabilité pluviométrique dans les régions guinéennes, pour fournir l'information climatique pertinente pour des applications locales, qu'elles soient hydrologiques ou agro-nomiques. C'est ce qui justifie la présente étude dont l'objectif est d'analyser la variabilité pluviométrique intrinsèque des saisons pluvieuses à l'échelle locale, notamment l'évolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons des pluies (DIS).

2.2 Données et méthode

2.2.1 Cadre physique et données de l'étude

Cette étude a été réalisée sur la zone guinéenne du Bénin (Figure 2.1). Cette zone est située au Sud du Bénin à une latitude comprise entre 6 et 8°N et à la longitude moyenne de 2°E. Le régime pluviométrique de la région est directement associé au déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) sur le continent africain entre deux positions de quasi-équilibre à 5°N et 10°N (Sultan et Janicot., 2000 ; Sultan et Janicot., 2003). On distingue dès lors deux saisons des pluies sur la région d'étude (Figure 2.2). La première (grande) saison des pluies s'étend de mars

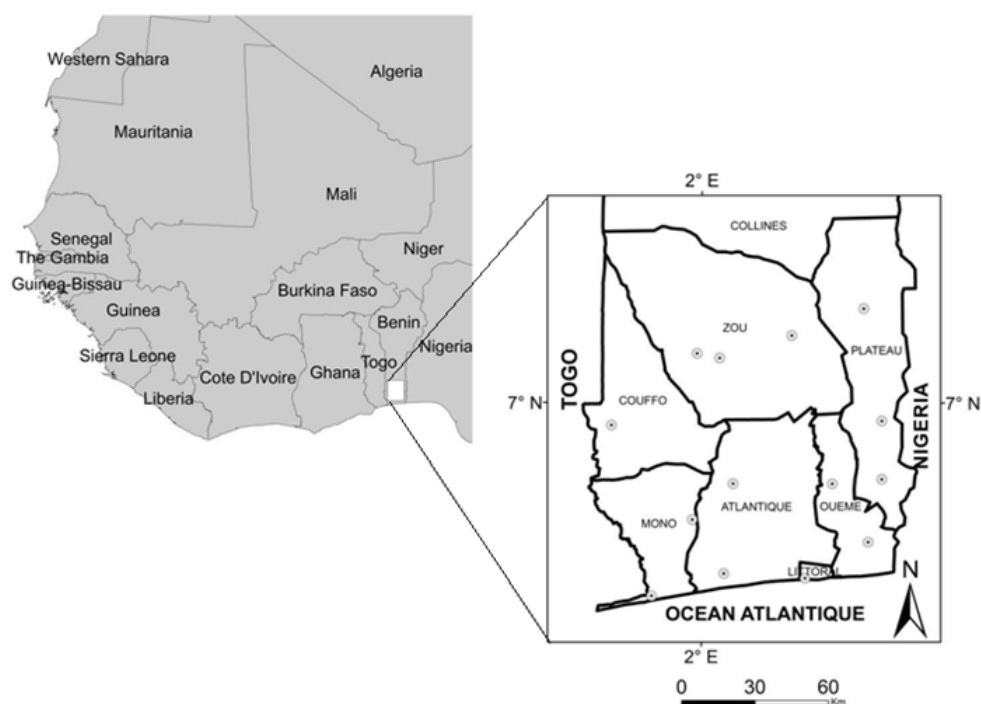


FIGURE 2.1 – Zone d'étude et réseau de stations pluviométriques (ronds noirs) utilisées

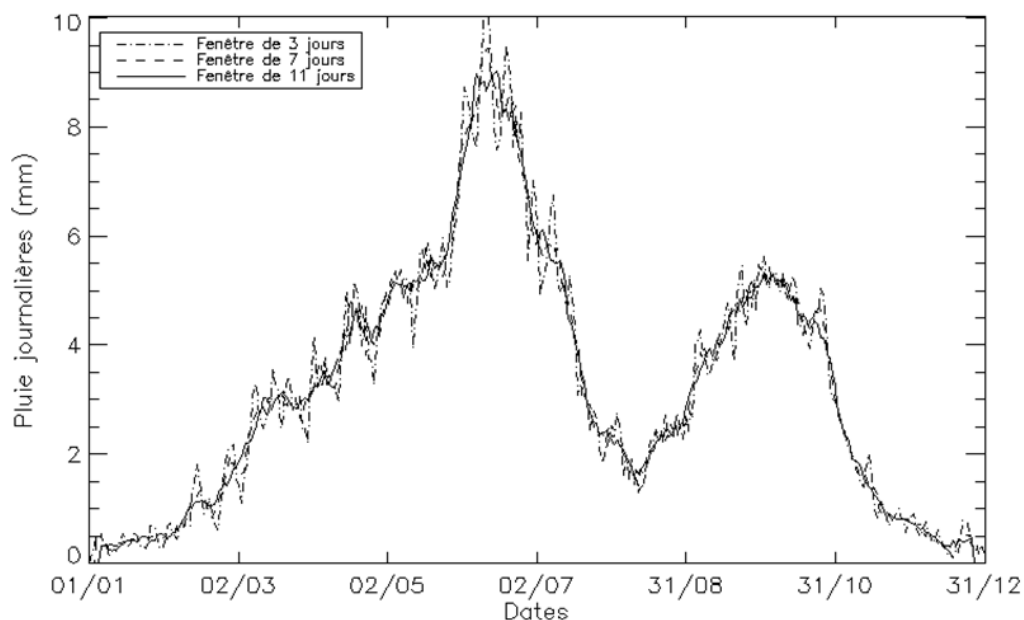


FIGURE 2.2 – Cycle saisonnier moyen des précipitations sur le Sud du Bénin entre 1951-2010. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 3 jours, 7 jours et 11 jours.

à juillet et présente un pic de pluie centré sur mi-juin. Le saut de mousson (Sultan et Janicot., 2003) entraîne une récession pluviométrique sur la région d'étude centrée sur le mois d'août. La seconde (petite) saison des pluies, liée au retour de la ZCIT vers les latitudes méridionales, s'étend de septembre à novembre et culmine en début octobre. La pluviométrie moyenne interannuelle sur la région d'étude est de 1100 mm entre 1951 et 2010.

Les données de l'étude sont issues du réseau national d'observation du climat géré par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les premières stations de ce réseau ont été installées sur la région d'étude depuis 1921. Cependant, c'est à partir de 1950 que ce réseau s'est densifié. L'amélioration de la qualité des données qui en a résulté a conduit au choix de la période 1951-2010 comme période de référence pour cette étude. Au regard des études antérieures sur l'Afrique de l'Ouest (Balme et al., 2006 ; Sané et al., 2008 ; Ali et al., 2008 ; Lebel et Ali, 2009), la période de référence 1951-2010 a été scindée en trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Pour cette étude, seules les stations qui ont moins de six années manquantes, soit un taux de fonctionnement d'au moins 90% sur 1951-2010, ont été retenues. A cet effet, l'année manquante a été définie comme une année qui a des observations manquantes, d'une part entre mars et juillet et, d'autre part, entre septembre et novembre. Le choix de ces périodes se justifie par le fait que la somme de leurs cumuls pluviométriques explique entre 88 et 95% de la variance du cumul annuel. Au total, 14 stations du réseau national installées sur la zone d'étude ont été retenues (Figure 2.1, Tableau 2.1).

2.2.2 Méthode

Choix des descripteurs intrasaisonniers de la saison des pluies (DIS)

Douze descripteurs intrasaisonniers (DIS) non exhaustifs de la saison des pluies ont été étudiés. Lesdits descripteurs sont : (i) le cumul saisonnier, (ii) le nombre de jours pluvieux, (iii) le cumul moyen des jours pluvieux, (iv) la durée moyenne des séquences sèches, (v) la durée moyenne des séquences humides, (vi) la probabilité de transition d'un jour sec vers un jour sec, (vii) la probabilité de transition d'un jour humide vers un jour humide, (viii) la probabilité de transition d'un jour sec vers un jour humide, (ix) la probabilité de transition d'un jour humide vers un jour

TABLE 2.1 – Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses

Stations	Lat	Long	Instal	Manquant	Cumul (mm)	Jp
Kétou	7.350	2.60	1950	2	917 (197)	59 (10)
Zagnanado	7.250	2.333	1921	2	906 (251)	58 (10)
Abomey	7.183	1.983	1921	5	924 (184)	72 (17)
Bohicon	7.166	2.066	1940	0	961 (199)	82 (11)
Pobè	6.933	2.666	1921	1	1039 (207)	89 (12)
Applahoué	6.916	1.666	1921	1	935 (208)	59 (8)
Sakété	6.716	2.666	1921	3	1020 (245)	61 (14)
Niaouli	6.700	2.116	1941	0	1010 (229)	70 (11)
Bopa	6.566	1.966	1921	3	827 (221)	50 (10)
Porto-Novo	6.483	2.616	1921	2	1162 (285)	67 (19)
Adjohoun	6.420	2.290	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Ouidah	6.366	2.001	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Cotonou	6.350	2.383	1952	2	1168 (316)	83 (11)
Grand-Popo	6.283	1.816	1921	2	864 (236)	45 (9)

Légende : Lat = latitude (en degré décimal); Long = longitude (en degré décimal); Instal= date d'installation des stations; Manquant = nombre d'années manquantes entre 1951 et 2010; Cumul= cumul pluviométrique moyen (1951-2010) annuel en mm; Jp = nombre de jours pluvieux ($> 1mm$)

sec, (x) le démarrage de la saison des pluies, (xi) la fin de la saison des pluies et (xii) la durée de la saison des pluies.

Définition du démarrage et de la fin de la saison des pluies

La définition des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies repose sur des considérations subjectives qui dépendent fortement de l'observateur (Balme et al., 2005). Selon Erpicum et al. (1988), la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie (pluie > 1 mm) au cours d'une pentade

(période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. De même, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une pentade. La longueur de la saison des pluies a été définie comme le nombre de jours entre son démarrage et sa fin. Cette méthode a déjà été implémentée en Afrique de l'Ouest par plusieurs auteurs (Ozer et *al.*, 2009 ; Kouassi et *al.*, 2010 ; Allé et *al.*, 2013).

Analyse des DIS

Les DIS ont été analysés en deux étapes. Au cours de la première étape, les DIS ont été calculés sur la base des saisons pluvieuses définies au regard des critères d'Erpicum et *al.*, (1988). Au cours de la deuxième étape, pour calculer les DIS relatifs à la première saison des pluies, nous avons retenu la période commune à toutes les premières saisons des pluies précédemment définies pour les trois sous-périodes. La même démarche a été adoptée pour calculer les DIS relatifs à la deuxième saison des pluies. Ceci a permis de mieux mettre en évidence dans les tendances pluviométriques la part liée aux variations des démarrages et des fins des saisons pluvieuses.

Calcul des indices pluviométriques

Le cumul saisonnier (P) peut être décomposé comme le produit du nombre de jours pluvieux (J) par leur cumul moyen (H) (Le Lay et Galle, 2005 ; Moron et *al.*, 2007). Ainsi, à partir de l'équation 2.2.1, H a été déterminé comme le ratio $\frac{P}{J}$. Par conséquent, la mesure de H peut apparaître comme artificielle contrairement à P et J qui sont des mesures réelles. Dans cette étude, un jour pluvieux a été défini comme un jour recevant plus de 1 mm de pluie. Ce seuil a été choisi parce que les pluies journalières inférieures à 1 mm augmentent le bruit entre les stations dans la détermination de certains descripteurs intrasaisonniers (Moron et *al.*, 2007).

$$P = J \times H \quad (2.2.1)$$

Pour analyser les variations du cumul saisonnier, l'indice pluviométrique standardisé (Equation 2.2.2) a été utilisé (Ali et *al.*, 2008). La saison des pluies pour

l'année I est qualifiée d'excédentaire si son IPS_I est positif et de déficitaire si son IPS_I est négatif.

$$IPS_i = \frac{P_R^I - \bar{P}_R}{\sigma_R} \quad (2.2.2)$$

où, IPS_I est l'indice pluviométrique régional de l'année I , P_R^I est la pluie moyenne régionale de l'année I , \bar{P}_R est la moyenne interannuelle de la pluie régionale et σ_R est l'écart-type de la pluie régionale \bar{P}_R . Les pluies journalières régionales ont été obtenues par krigeage à partir des 14 stations pluviométriques retenues pour cette étude. A cet effet, un modèle de variogramme de type exponentiel de pépité 0.3, de portée 53 km et de palier 0.9 a été utilisé.

La même démarche méthodologique liée au calcul de l' IPS_I a été appliquée aux séries annuelles régionales de nombre de jours pluvieux et de leur cumul moyen. Ceci a permis de calculer leurs indices respectifs pour chaque année.

Calcul des probabilités de transition

Les durées moyennes des séquences sèches ou humides ainsi que les différentes probabilités de changement d'états (sec vers humide ou vice versa) ont été calculées à partir de la chaîne de Markov d'ordre 1. En effet, plusieurs auteurs (Caske, 1963 ; Hopkins et Robillard, 1964 ; Feyerheram et Barkl, 1965 ; Afouda, 1985) ont montré la possibilité d'utiliser le modèle de calcul des probabilités par la chaîne de Markov d'ordre 1 pour décrire les séquences sèches et humides. Ainsi, cette étude a analysé la succession et le changement d'états des jours via le calcul des probabilités par la chaîne de Markov d'ordre 1. Ces probabilités ont été calculées en chacune des 14 stations avant d'être moyennées à l'échelle de la région.

Considérons en effet une famille de variable aléatoire (v.a.) $[X(t), t \in T]$ indexée par le paramètre $t \in T$ où $(T = 0, 1, 2, \dots)$ et soit E_1, E_2, \dots, E_J , un système complet d'événements où la réalisation de chaque tirage est considérée en terme de l'événement E_J , ($J = 1, 2, \dots$). On définit la v.a. discrète $[X(t); t \in T; T=(0,1,2,\dots)]$ telle que $X(t) = J$ si la réalisation du tirage au temps t est E_J . Si les tirages sont indépendants, on aura :

$$P_r(X_t = J \mid X_0 = I_0, X_1 = I_1, \dots, X_{(t-1)} = I_{(t-1)}) = P_r(X_t = J) \quad (2.2.3)$$

pour tout t et pour toutes les valeurs possibles de la v.a. On dit que les tirages consécutifs ou les v.a. associées à ces tirages $[X(t), t \in T]$ forment une chaîne de Markov d'ordre 1, si pour tout $t \in T$ et pour toutes les valeurs possibles de la v.a.,

$$P_r(X_t = J \mid X_0 = I_0, X_1 = I_1, \dots, X_{t-1} = I_{t-1}) = P_r(X = j \mid X_{t-1} = I_{t-1}) \quad (2.2.4)$$

On peut définir par extension les chaînes de Markov d'ordre ≥ 0 , les chaînes de Markov d'ordre zéro correspondant aux tirages indépendants. Les événements E_J sont appelés les états du système hydrologique. Pour le processus considéré dans le cadre de cette étude, les E_J sont les états secs ou humides, généralement désignés par l'état 0 et 1. La distribution de probabilité $P_r(X_0 = J) = [P(0), J = (0, 1)]$ est appelée la distribution initiale et, les probabilités conditionnelles $P_r(X_t = J \mid X_{t-1} = I)$ sont les probabilités de transition. Si $X_{t-1} = I$ et $X_t = J$, on dit que le système effectue une transition de E_I vers E_J . Si l'on connaît la distribution initiale et la probabilité de transition, on peut déterminer de façon unique la distribution de la v.a. $(X(t))$.

Pour la simplicité de la présentation, nous avons considéré les chaînes de Markov homogènes. On sait que les chaînes de Markov homogènes forment une classe spéciale, leur propriété caractéristique étant que les probabilités de transition sont indépendantes de t , c'est à dire que l'on a :

$$P_r\{X_t = J \mid X_{t-1} = I_{t-1}\} = \beta_{IJ} \quad (2.2.5)$$

où, X_t est la réalisation pour le jour t ; X_{t-1} est celle du jour $t-1$ et β_{ij} est la probabilité de transition (Afouda, 1985). A l'ordre 1, les probabilités de transition possibles sont résumées dans le tableau 2.2 :

Dans la pratique, les calculs s'effectuent à partir d'un nombre fini de jours d'observations. Sur la base de la notation adoptée pour les états secs et humides, on peut déterminer les couples de jours N_{IJ} tels que :

$$N_0 = N_{00} + N_{01} \quad (2.2.6)$$

$$N_1 = N_{10} + N_{11} \quad (2.2.7)$$

$$N = N_0 + N_1 \quad (2.2.8)$$

TABLE 2.2 – Probabilités de transition pour les chaînes de Markov à l'ordre 1.

Etat du jour t-1	Etat du jour t	
	0	1
0	β_{00}	β_{01}
1	β_{10}	β_{11}

Légende : β_{00} est la probabilité de transition d'un jour sec vers un jour sec, β_{01} est la probabilité de transition d'un jour sec vers un jour humide, β_{10} est la probabilité de transition d'un jour humide vers un jour sec et β_{11} est la probabilité de transition d'un jour humide vers un jour humide.

désignent respectivement le nombre de jours secs, le nombre de jours humides et le nombre total de jours d'observation. N_{01} et N_{10} représentent respectivement le nombre de jours de changement d'état de sec vers humide et d'un jour humide vers un jour sec. N_{00} et N_{11} représentent respectivement le nombre de deux jours secs consécutifs et le nombre de deux jours humides consécutifs. On en déduit les expressions suivantes :

$$\beta_{IJ} = \frac{N_{IJ}}{N_I} \quad (2.2.9)$$

$$E(S_0) = \frac{1}{1 - \beta_{00}} \quad (2.2.10)$$

$$\sigma(S_0) = \sqrt{\frac{\beta_{00}}{1 - \beta_{00}}} \quad (2.2.11)$$

$$C_V(S_0) = \sqrt{\beta_{00}} \quad (2.2.12)$$

où, β_{IJ} représente la forme générale des probabilités de transition, $E(S_0)$, $\sigma(S_0)$ et $C_V(S_0)$ sont respectivement l'espérance mathématique, l'écart-type et le coefficient de variation des durées de séquences sèches (Afouda, 1985).

Les mêmes calculs s'effectuent pour les séquences humides en remplaçant les indices caractérisant les séquences sèches par ceux caractérisant les séquences humides.

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Evolution des dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses

Les modifications des dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses telles que définies à partir des critères d'Erpicum et *al.*, (1988) sont consignées dans le tableau 2.3.

TABLE 2.3 – Dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses au regard des critères d'Erpicum et *al.*, (1988) entre 1951 et 2010 au sud-Bénin.

	GSP			PSP		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Début	18/03	15/04	10/04	14/09	04/09	30/08
Fin	14/07	14/07	09/07	29/10	22/10	01/11
Durée (en jours)	118	90	100	45	48	63

Légende : P1 = 1951-1970 ; P2 = 1971-1990 ; P3 = 1991-2010

Entre 1951-1970 et 1971-1990, le démarrage de la première saison des pluies a accusé environ un mois de retard, alors que sa fin est restée inchangée. En effet, sur la période 1971-1990, cette saison a débuté en moyenne le 15 avril au lieu du 18 mars. En conséquence, sa durée s'est réduite de 118 à 90 jours en moyenne, soit un raccourcissement de 24%. Depuis 1990, cette saison a tendance à débuter précocement et à finir tardivement, s'allongeant ainsi de 10 jours en moyenne au regard de la sous-période 1971-1990. Toutefois, par rapport à la sous-période 1951-1970, son démarrage demeure tardif d'une vingtaine de jours, mais sa fin a reculé de 5 jours.

Quant à la deuxième saison des pluies, son démarrage et sa fin ont été plus précoces d'une dizaine de jours environ entre 1951-1970 et 1971-1990. Il en résulte un allongement de 6% (45 à 48 jours) de cette saison pendant la sous-période 1971-1990. Après 1990, elle a continué à démarrer précocement et sa fin est redevenue

plus tardive. En conséquence, on observe un allongement de cette saison de 30% (48 à 63 jours) entre 1971-1990 et 1991-2010 et de 40% (45 à 63 jours) au regard de la sous-période 1951-1970. Soulignons que les dates de démarrage et de fin de la deuxième saison des pluies enregistrées après 1990 sont respectivement les plus précoces et les plus tardives qu'on ait observées sur la période d'étude (1951-2010).

En résumé, après 1970, la première saison des pluies a raccourci, essentiellement du fait de son démarrage tardif alors que la deuxième saison des pluies s'est allongée en raison de la précocité de son démarrage. Le raccourcissement de la première saison des pluies est en phase avec les résultats de Kniveton *et al.* (2008) qui montrent un retard significatif dans le début de la saison pluvieuse en Afrique de l'Ouest. En revanche, le rallongement de la deuxième saison des pluies apparaît plus caractéristique de la région d'étude. Ces changements des dates de démarrage des saisons pluvieuses peuvent impacter l'agriculture, car d'elles dépendent le calendrier agricole et, en partie, les quantités récoltées (Camberlin et Diop, 2003).

2.3.2 Variabilité interannuelle et pluri-décennale des indices pluviométriques

Le régime pluviométrique au sud-Bénin est caractérisé par une forte variabilité interannuelle à laquelle se superpose un signal pluri-décennal fort (Figures 2.4 et 2.3). La comparaison des indices du cumul saisonnier (IPS_i) de la première saison et de la deuxième saison des pluies montre que ces deux saisons pluvieuses sont différemment affectées par les forçages atmosphériques. Cette assertion est confirmée par la quasi absence de corrélation entre leurs IPS ($R^2 = 0,01$). En effet, l'analyse de la figure 2.3 montre une succession quasi ininterrompue des IPS_i positifs entre 1951 et 1970 pour la première saison des pluies, alors que cette succession est largement bruitée par l'occurrence des IPS_i négatifs dans le cas de la deuxième saison des pluies (Figure 2.4). En outre, des différences en termes de nombre de jours pluvieux sont également observables entre ces deux saisons pluvieuses. Entre 1951 et 1970, la première saison des pluies a été caractérisée par une forte occurrence de jours pluvieux, alors que la deuxième saison des pluies a enregistré des déficits de jours pluvieux. Inversement, après 1990, la deuxième saison des pluies

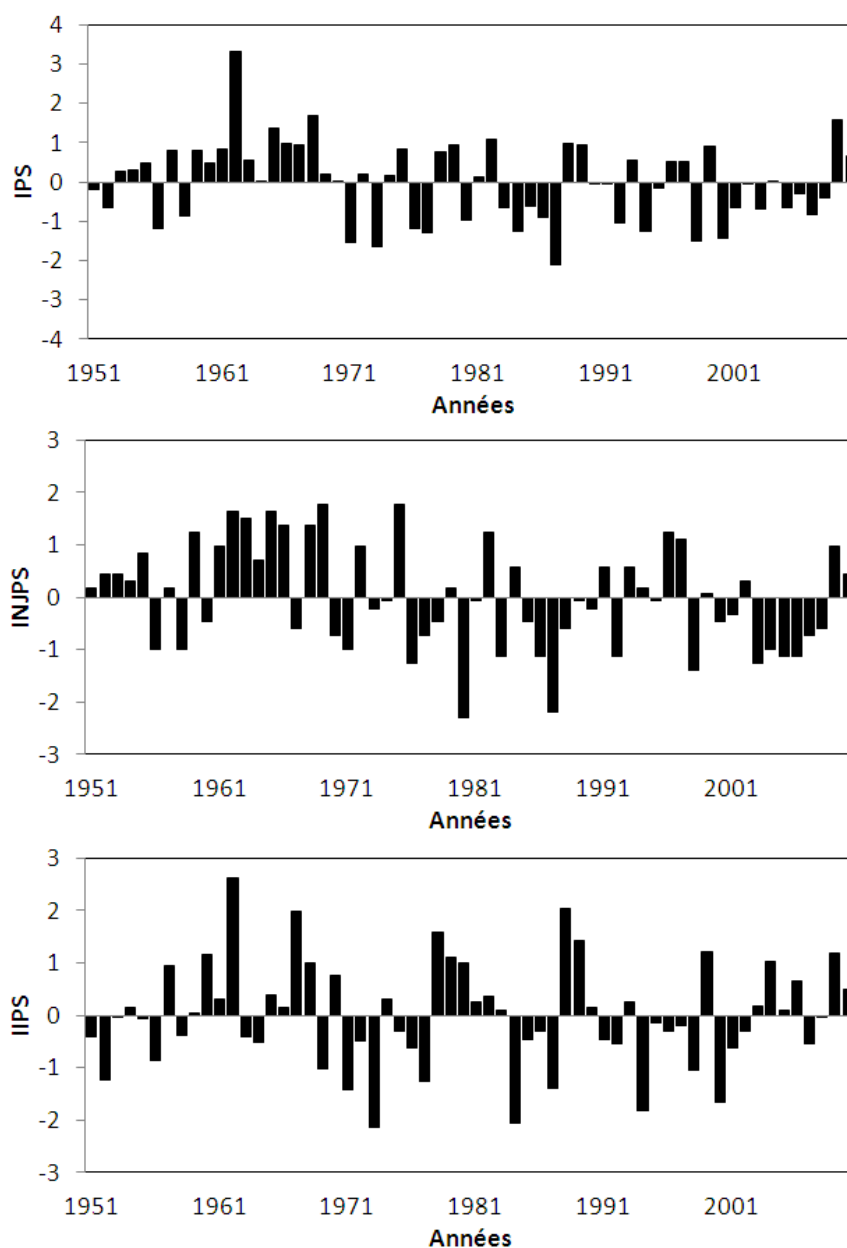


FIGURE 2.3 – Indice pluviométrique (IPS), indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et indice du cumul moyen des jours pluvieux (IIJPS) de la première saison des pluies au sud-Bénin de 1951 à 2010.

a enregistré un excédent en termes de nombre de jours pluvieux, contrairement à la première saison des pluies qui est caractérisée par une baisse notable du nombre de jours pluvieux. Quant au cumul moyen des jours pluvieux, aucune tendance nette ne se dégage pour les deux saisons pluvieuses.

La première étape d'analyse des DIS, basée sur les saisons définies à partir des

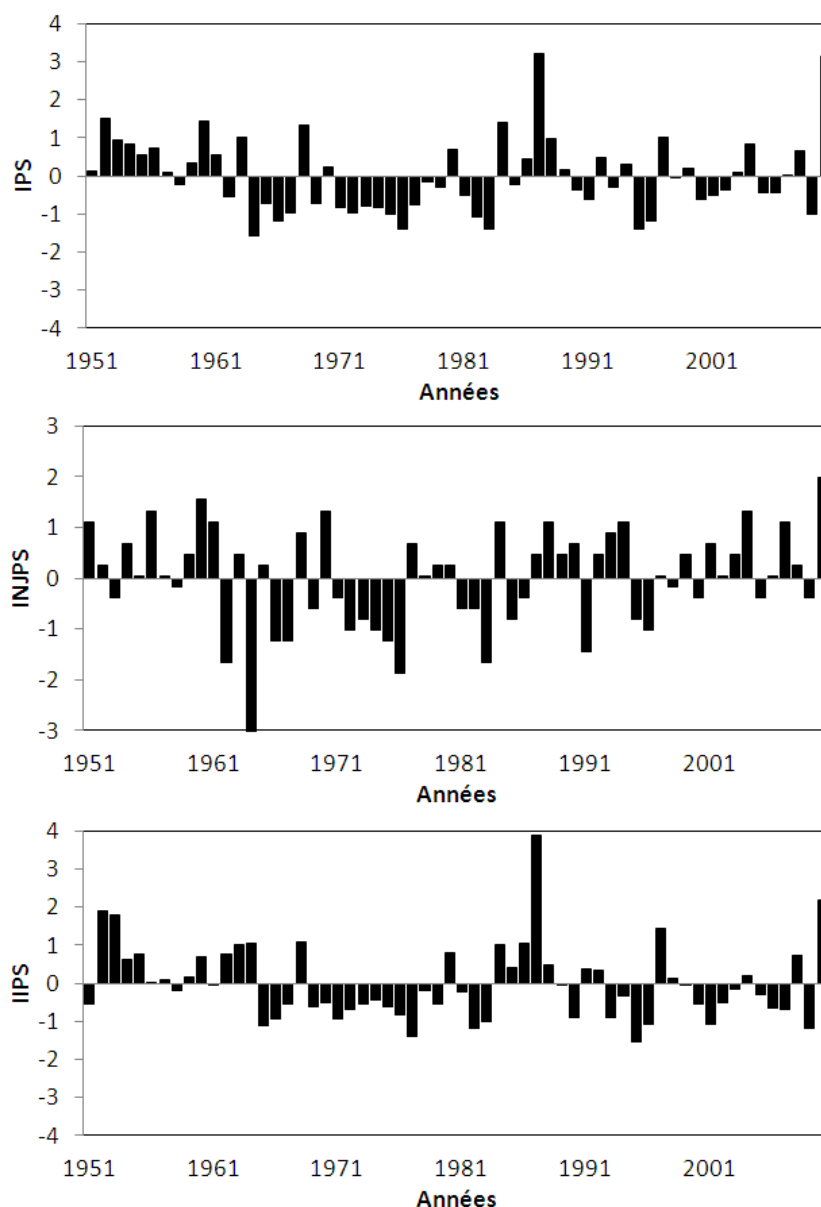


FIGURE 2.4 – Indice pluviométrique (IPS), indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et indice du cumul moyen des jours pluvieux (IIJPS) de la deuxième saison des pluies au sud-Bénin de 1951 à 2010.

critères d'Epicum *et al.*, (1988), montre des tendances contraires pour les deux saisons des pluies (Tableau 2.4). En effet, pour la première saison des pluies (PSP), c'est au cours de la sous-période 1971-1990 que l'on enregistre le déficit pluviométrique le plus marqué. Ce déficit s'amointrit au cours de la dernière sous-période (1991-2010) qui, toutefois, demeure déficitaire au regard de la sous-période la plus humide (1951-1970). Il convient de souligner que ces tendances pluviométriques sont syn-

chrones avec la variabilité du nombre de jours pluvieux, leur cumul moyen ayant faiblement varié (entre 0,08 et -0,05) sur la période d'étude (1951-2010). Ces tendances sont inversées pour la deuxième saison des pluies (DSP). Ainsi, la dernière sous-période (1991-2010) apparaît plus humide que la première (1951-1970), mais la sous-période 1971-1990 demeure la plus sèche des trois. Comme pour la première saison des pluies, c'est le nombre de jours pluvieux qui explique essentiellement ces variations pluviométriques. Pour cette première étape d'analyse, on remarque donc une inversion de phase dans l'évolution des cumuls saisonniers des deux saisons pluvieuses. En comparaison avec la variabilité de la durée des saisons pluvieuses (Tableau 2.3), on se rend compte que pour chacune des deux saisons pluvieuses, la sous-période qui enregistre le cumul saisonnier le plus élevé est celle où la saison est la plus longue. Ceci semble témoigner de l'existence d'un lien entre la longueur des saisons pluvieuses, le nombre de jours pluvieux et le cumul saisonnier.

TABLE 2.4 – Indices moyens du cumul pluviométrique, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux pour les trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Les indices ont été calculés sur la base des bornes variables (Tableau 2.3).

Paramètres pluviométriques	1951-1970		1971-1990		1991-2010	
	PSP	DSP	PSP	DSP	PSP	DSP
Cumul saisonnier	0.85	-0.13	-0.63	-0.35	-0.22	0.48
Nombre de jours pluvieux	1.06	-0.38	-0.78	-0.56	-0.28	0.94
Cumul moyen des jours pluvieux	0.08	0.25	-0.05	-0.02	-0.03	-0.23

Légende : PSP = première (grande) saison des pluies ; DSP = deuxième (petite) saison des pluies

La seconde étape d'analyse, basée sur les périodes communes (du 15 avril au 14 juillet pour PSP et du 14 septembre au 22 octobre pour DSP) aux saisons des trois sous-périodes, fait ressortir quelques différences par rapport à la première analyse, soulignant ainsi la part de la variabilité des dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses dans l'évolution des DIS. Pour la PSP, les tendances entre les sous-périodes restent identiques à celles de la première analyse. Cependant, on note une diminution de l'amplitude des variations du cumul saisonnier et du

nombre de jours pluvieux, alors que le cumul moyen des jours pluvieux est apparu plus variable (entre 0,23 et -0,10), au regard de la première analyse. Pour la DSP, la sous-période 1991-2010 n'apparaît plus comme la plus humide et c'est à nouveau la sous-période 1951-1970 qui est la plus humide. Néanmoins, la tendance du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux reste comparable à celle observée dans la première analyse, mais avec une moindre variation du nombre de jours pluvieux.

TABLE 2.5 – Indices moyens du cumul pluviométrique, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux pour les trois sous-périodes de 20 ans : 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010. Les indices ont été calculés sur la base des bornes communes (du 15 avril au 14 juillet et du 14 septembre au 22 octobre).

Paramètres pluviométriques	1951-1970		1971-1990		1991-2010	
	PSP	DSP	PSP	DSP	PSP	DSP
Cumul saisonnier	0.51	0.19	-0.30	-0.18	-0.21	0.01
Nombre de jours pluvieux	0.54	0.05	-0.36	-0.26	-0.19	0.22
Cumul moyen des jours pluvieux	0.23	0.28	-0.10	-0.10	-0.13	-0.18

Légende : PSP = première (grande) saison des pluies ; DSP = deuxième (petite) saison des pluies

L'analyse de la corrélation réalisée entre l'indice du cumul saisonnier (IPS) et les indices du nombre de jours pluvieux (INJPS) et du cumul moyen des jours pluvieux (IIJPS) confirme bien le poids prépondérant du nombre de jours pluvieux dans la variabilité du cumul saisonnier. En effet, pour les deux saisons pluvieuses, le nombre de jours pluvieux explique largement (plus de 60%) la variance du cumul saisonnier (Figure 2.5). Ce résultat rejoint celui mis en évidence par Le Barbé et *al.* (2002) et Lebel et Ali (2009), à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, à savoir que la variabilité du cumul annuel est davantage liée à celle du nombre d'événements pluvieux qu'à la hauteur de pluie par événement. Cependant, la part de la variance du cumul saisonnier expliquée par le cumul moyen des jours pluvieux est plus importante pour la deuxième saison des pluies que pour la première saison des pluies.

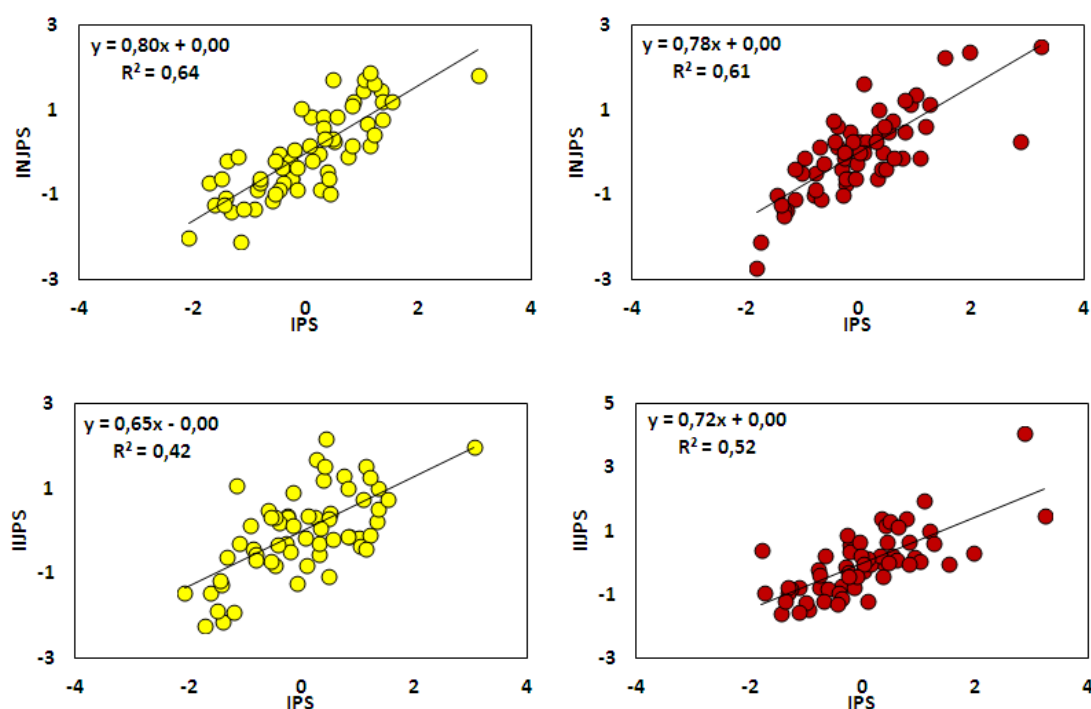


FIGURE 2.5 – Corrélation entre l'indice du cumul saisonnier (IPS) et, du haut vers le bas, l'indice du nombre de jours pluvieux (INJPS) et l'indice de leur cumul moyen (IIJPS) pour la première saison des pluies (à gauche en jaune) et la deuxième saison des pluies (à droite en rouge), au sud-Bénin entre 1951-2010.

2.3.3 Modification des probabilités de transition

De façon générale, les deux saisons pluvieuses sont caractérisées par de fortes probabilités de transition d'un jour humide vers un jour sec et d'un jour sec vers un jour sec (Tableau 2.6 à 2.9). La durée moyenne des séquences sèches est d'environ 3.5 jours et celle des séquences humides est d'environ 1.5 jours. Les séquences sèches ont tendance à être plus longues pendant la deuxième saison des pluies que pendant la première saison des pluies, alors que la durée moyenne des séquences humides est quasi identique pour les deux saisons des pluies.

L'analyse de l'occurrence des jours secs et humides sur la base des saisons définies au regard des critères d'Ercicum et *al.*, (1988) montre également deux tendances contrastées selon la saison pluvieuse considérée. Pour la première saison des pluies (Tableau 2.6), la probabilité d'occurrence de deux jours secs consécutifs a régulièrement augmenté depuis 1951-1970. La fréquence d'occurrence d'un jour

TABLE 2.6 – Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la première saison des pluies définie sur la base des bornes variables.

Sous-périodes	β_{IJ}				Caract. SS (J)			Caract. SH (J)		
	β_{00}	β_{01}	β_{11}	β_{10}	E	σ	C_V	E	σ	C_V
1951-1970	0.67	0.33	0.33	0.67	3.1	1.5	0.8	1.5	0.7	0.5
1971-1990	0.68	0.32	0.32	0.68	3.3	1.5	0.8	1.4	0.6	0.5
1991-2010	0.70	0.30	0.32	0.68	3.5	1.5	0.8	1.4	0.6	0.5

Légende : β_{00} = probabilité de transition d'un jour sec vers un jour sec ; β_{01} = probabilité de transition d'un jour sec vers un jour humide ; β_{10} = probabilité de transition d'un jour humide vers un jour sec ; β_{11} = probabilité de transition d'un jour humide vers un jour humide ; Caract. SS = Caractéristiques des durées de séquences sèches ; Caract. SH ; Caractéristiques des durées de séquences humides ; E = moyenne ; σ = écart-type ; C_V = coefficient de variation.

TABLE 2.7 – Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d'ordre 1 pour la deuxième saison des pluies définie sur la base des bornes variables.

Sous-périodes	β_{IJ}				Caract. SS (J)			Caract. SH (J)		
	β_{00}	β_{01}	β_{11}	β_{10}	E	σ	C_V	E	σ	C_V
1951-1970	0.65	0.35	0.35	0.65	3.4	1.4	0.8	1.5	0.7	0.5
1971-1990	0.70	0.30	0.30	0.70	3.7	1.6	0.8	1.5	0.6	0.5
1991-2010	0.69	0.31	0.33	0.67	3.7	1.6	0.8	1.5	0.6	0.5

Légende : idem que pour le tableau 2.6.

sec après un jour humide a aussi augmenté après 1970, mais depuis 1990, elle semble se stabiliser à sa valeur de 1971-1990. Ces augmentations ont entraîné un allongement régulier des séquences sèches entre 1951 et 2010 (de 3.1 à 3.5 jours).

A l'inverse, les probabilités conditionnelles d'occurrence de jours humides ont régressé, faisant passer la durée moyenne des séquences humides de 1.5 à 1.4 jours de 1951-1970 à 1991-2010. Pour la deuxième saison des pluies (Tableau 2.7), les tendances sont similaires à celles de la première saison des pluies entre 1951-1970 et 1971-1990. Ainsi, la durée moyenne des séquences sèches a augmenté de 3,4 à 3,7 jours, mais celle des séquences humides n'a pas varié entre ces deux sous-périodes. En revanche, après 1990, on note une diminution des probabilités conditionnelles d'occurrence de jours secs et une augmentation de celles des jours humides au regard de la sous-période 1971-1990, mais aucune amélioration de la durée moyenne des séquences sèches et humides n'a été remarquée. Néanmoins, ces probabilités ne sont pas encore revenues à leur niveau de 1951-1970. Ces résultats corroborent ceux de Agbossou et *al.*, (2012) qui montrent une augmentation dans la succession des décades sèches sur l'ensemble du Bénin après 1970. Il en résulte une précarité des pluies dans le temps qui a des répercussions directes sur les cultures (Camberlin et Diop, 2003).

En analysant l'occurrence des jours secs et humides sur la base des périodes communes aux saisons des trois sous-périodes (du 15 avril au 14 juillet pour PSP et du 14 septembre au 22 octobre pour DSP), on s'aperçoit, pour la première saison des pluies (Tableau 2.8), que les tendances entre les trois sous-périodes sont identiques à celles observées lors de la première analyse. Toutefois, les écarts se sont davantage creusés entre les sous-périodes 1951-1970 et 1991-2010, du fait que l'amplitude des différences a augmenté entre 1951-1970 et 1971-1990. Pour la deuxième saison des pluies (Tableau 2.9), les tendances entre les trois sous-périodes sont également identiques à celles mises en évidence dans la première analyse. En revanche, contrairement à la première saison des pluies, après 1990, la répartition séquentielle des pluies (entre séquences sèches et humides) est redevenue comparable à celle de 1951-1970.

TABLE 2.8 – Probabilités de transition entre jours secs et jours humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d’ordre 1 pour la première saison des pluies définie sur la base des bornes communes.

Sous-périodes	β_{IJ}				Caract. SS (J)			Caract. SH (J)		
	β_{00}	β_{01}	β_{11}	β_{10}	E	σ	C_V	E	σ	C_V
1951-1970	0.63	0.37	0.35	0.65	2.9	1.3	0.8	1.6	0.7	0.6
1971-1990	0.70	0.30	0.30	0.70	3.3	1.5	0.8	1.4	0.6	0.5
1991-2010	0.71	0.29	0.30	0.70	3.4	1.5	0.8	1.4	0.6	0.5

Légende : idem que pour le tableau 2.6.

TABLE 2.9 – Probabilités de transition entre les jours secs et humides et caractéristiques des durées de séquences sèches et humides (moyennes des 14 stations) calculées par les chaînes de Markov d’ordre 1 pour la deuxième saison des pluies définie sur la base des bornes communes.

Sous-périodes	β_{IJ}				Caract. SS (J)			Caract. SH (J)		
	β_{00}	β_{01}	β_{11}	β_{10}	E	σ	C_V	E	σ	C_V
1951-1970	0.65	0.35	0.35	0.65	3.4	1.5	0.8	1.6	0.7	0.5
1971-1990	0.67	0.33	0.30	0.70	3.5	1.5	0.8	1.5	0.6	0.5
1991-2010	0.65	0.35	0.34	0.66	3.4	1.5	0.8	1.5	0.7	0.5

Légende : idem que pour le tableau 2.6.

2.4 Conclusion de chapitre

Cette étude a permis de décrire plus finement la variabilité intrasaisonnière des pluies au Sud du Bénin aux échelles pertinentes pour des applications agro-nomiques et hydrologiques. En ce sens, la mise en évidence de l'évolution des DIS des deux saisons pluvieuses depuis 1951 est un résultat important, puisque pour explorer la variabilité pluviométrique en bordure du Golfe de Guinée, c'est l'échelle annuelle qui a souvent été utilisée (Paturel et *al.*, 1998 ; Servat et *al.*, 1999). Ainsi, les années 1950 et 1960 ont été globalement considérées comme humides au regard des années sèches (1970 et 1980). Cependant, les résultats de la présente étude montrent que la première saison des pluies et la deuxième saison des pluies qui constituent toutes deux l'essentiel du cumul annuel ne sont pas affectées de la même manière par les forçages atmosphériques. Alors que la première saison des pluies était excédentaire en 1951-1970, la deuxième saison des pluies, à l'inverse, était déficitaire. Inversement, depuis 1990, c'est la deuxième saison des pluies qui devient excédentaire alors que la première saison des pluies demeure déficitaire. Des différences existent également entre les deux saisons pluvieuses dans l'explication de la variance du cumul saisonnier. Pour la première saison des pluies, la variance du cumul pluviométrique est largement expliquée par le nombre de jours pluvieux, alors que pour la deuxième saison des pluies, en plus des jours pluvieux, le cumul moyen explique plus de 50% de la variance du cumul pluviométrique. Le Barbé et *al.*, (2002) ont montré que la variabilité du cumul annuel est davantage liée à celle du nombre d'événements pluvieux qu'à la hauteur de pluie par événement. La présente étude confirme cette information et quantifie l'importance relative de l'occurrence des jours pluvieux et des cumuls associés à ces jours pluvieux dans la variabilité du cumul saisonnier de chacune des deux saisons pluvieuses.

L'étude montre aussi que les forçages atmosphériques, responsables de la forte occurrence d'années sèches pendant la sous-période 1971-1990, se sont traduits pour les deux saisons pluvieuses, par une recrudescence des jours secs doublée d'un allongement des séquences sèches et d'un raccourcissement des séquences humides sur cette sous-période. Agbossou et *al.*, (2012) avaient déjà montré une augmentation de la probabilité d'occurrence des décades sèches sur l'ensemble du Bénin après 1970, mais leur étude s'est limitée à la période 1951-1990. Le présent

travail reprend cette étude, sur la région d'étude, à l'échelle saisonnière jusqu'en 2010 et au pas de temps journalier. Ainsi, il apparaît que la première saison des pluies présente, après 1990, la même précarité que lors de la sous-période 1971-1990, alors que la deuxième saison des pluies enregistre une amélioration significative de la distribution séquentielle des pluies, comparable à celle de 1951-1970. Enfin, notre approche a permis de comprendre l'influence de la variabilité des dates de démarrage et de fin des saisons pluvieuses sur l'évolution des DIS. Les indices pluviométriques et les probabilités de transition calculés sur les sous-périodes où la saison des pluies est plus longue sont amplifiés, alors que ceux calculés sur les sous-périodes où la saison des pluies est raccourcie sont atténués, au regard des indices calculés sur les périodes communes aux saisons des trois sous-périodes. Cependant, les tendances pluviométriques entre les sous-périodes ne sont pas modifiées, excepté pour le cumul saisonnier de la deuxième saison des pluies.

Les changements des précipitations mis en évidence dans cette étude corroborent les perceptions qu'ont les producteurs desdits changements (Allé et *al.*, 2013). L'étude ouvre ainsi des perspectives d'élaboration de stratégies d'adaptation aux changements des précipitations à l'échelle locale.

Changements climatiques, perceptions et adaptations des producteurs sur le Plateau d'Allada au sud du Bénin

Ce chapitre a été publié tel qu'il suit :

Allé CSUY, Vissoh VP, Guibert H, Agbossou KE, Gozé E, Afouda AA, 2013.
Changements climatiques, perceptions et adaptations des producteurs sur le
Plateau d'Allada au sud du Bénin. *European Journal of Scientific Research* 107 :
530-545.

Changements climatiques, perceptions et adaptations des producteurs sur le Plateau d'Allada au sud du Bénin

Résumé

La présente étude analyse les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques, la cohérence de celles-ci avec les observations climatiques et les mesures d'adaptation adoptées par les producteurs sur le plateau d'Allada au sud du Bénin. A cet effet, les données liées à la pluviométrie, la température et les vents, pour la période allant de 1951 à 2010, ont été analysées. Les perceptions et mesures d'adaptation des producteurs ont été collectées à l'aide d'un questionnaire structuré auprès de 201 producteurs sur le plateau d'Allada en 2010. Lors de l'analyse, les producteurs ont été classés en trois groupes selon leur âge : i) moins de 41 ans, ii) entre 41 et 55 ans et plus de 55 ans. Le test de khi-2 (χ^2) a été utilisé pour vérifier si les perceptions des producteurs sont indépendantes de leur âge. Pour chaque groupe, le nombre de personnes ayant adopté une mesure d'adaptation donnée a été calculé. Le tableau de contingence obtenu a été soumis à une analyse factorielle des correspondances. Les perceptions des producteurs et les observations climatiques ne convergent pas toujours. En outre, l'âge influence les perceptions des producteurs et détermine l'adoption des mesures d'adaptation. Il importe de comprendre la cause des divergences entre perceptions et observations climatiques.

Mots-clés : changements climatiques, vents, perceptions, adaptation, Afrique.

3.1 Introduction

L'économie des populations rurales d'Afrique de l'Ouest et leur sécurité alimentaire sont étroitement dépendantes de l'agriculture pluviale qui représente près de 93% des terres cultivées (Sultan et *al.*, 2012). En outre, le secteur agricole emploie plus de 70% de la main d'œuvre totale (FAO, 2003). Dans ce contexte, la gamme de variabilités climatiques, allant de l'échelle intra-saisonnière (supérieure à 10 jours)

aux échelles décennale et pluri-décennale, impacte négativement les écosystèmes et les activités humaines, particulièrement sur le continent africain (Fontaine et *al.*, 2012). Cela s'illustre par le fait que depuis les années 1970, les variations du climat, en aggravant fortement les conséquences de crises politiques, ont contribué aux plus grandes famines ayant nécessité un recours à l'aide alimentaire internationale (Dilley et *al.*, 2005).

A cette variation du climat, s'ajoutent les impacts annoncés des changements climatiques. En effet, le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), a prévu une augmentation de la température partout dans le monde ainsi que la probable exacerbation des extrêmes climatiques comme les sécheresses et les inondations. Le même rapport identifie l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques. Un tel bouleversement aura assurément des répercussions sur les ressources hydriques et sur la production agricole (CGIAR, 2009). L'enjeu est tel que, malgré les incertitudes qui entachent les projections climatiques sur l'Afrique de l'Ouest (Fontaine et *al.*, 2012), il faut d'ores et déjà réfléchir aux options d'adaptation pour réduire les impacts néfastes des aléas climatiques sur la population africaine et augmenter la sécurité alimentaire (Sultan et *al.*, 2012).

D'après O'Brien et *al.* (2010), les perceptions paysannes peuvent être des limites à l'adaptation aux changements climatiques. En conséquence, elles nécessitent autant d'attention que l'étude des caractéristiques socio-économiques ou des scénarios climatiques. Bien que de nombreuses études ont rapporté les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques en Afrique (Tschakert, 2007 ; Mertz et *al.*, 2009 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Agossou et *al.*, 2012 ; Moyo et *al.*, 2012 ; Kisauzi et *al.*, 2012 ; Tambo et Abdoulaye, 2012), peu d'études ont apporté des preuves climatologiques de ces perceptions, notamment en région guinéenne.

La présente étude vise à analyser les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques, la cohérence de celles-ci avec les observations climatiques et les mesures d'adaptation adoptées par les producteurs pour faire face auxdits changements climatiques sur le plateau d'Allada au sud du Bénin.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Présentation du milieu d'étude

Cette étude a été conduite sur le plateau d'Allada (Figure 3.1). Le plateau d'Allada est situé au sud du Bénin en région guinéenne entre les longitudes 1.5°E et 2.3°E et les latitudes 6.2°N et 7°N. Le régime pluviométrique est directement associé aux mouvements méridiens de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). De ce fait, il est caractérisé par deux saisons des pluies : la première va de mars à juillet et la deuxième va de septembre à novembre. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1100 mm entre 1951 et 2010, la température moyenne journalière varie entre 25°C et 29°C et la vitesse moyenne journalière est d'environ 4 m/s entre 1961 et 2010.

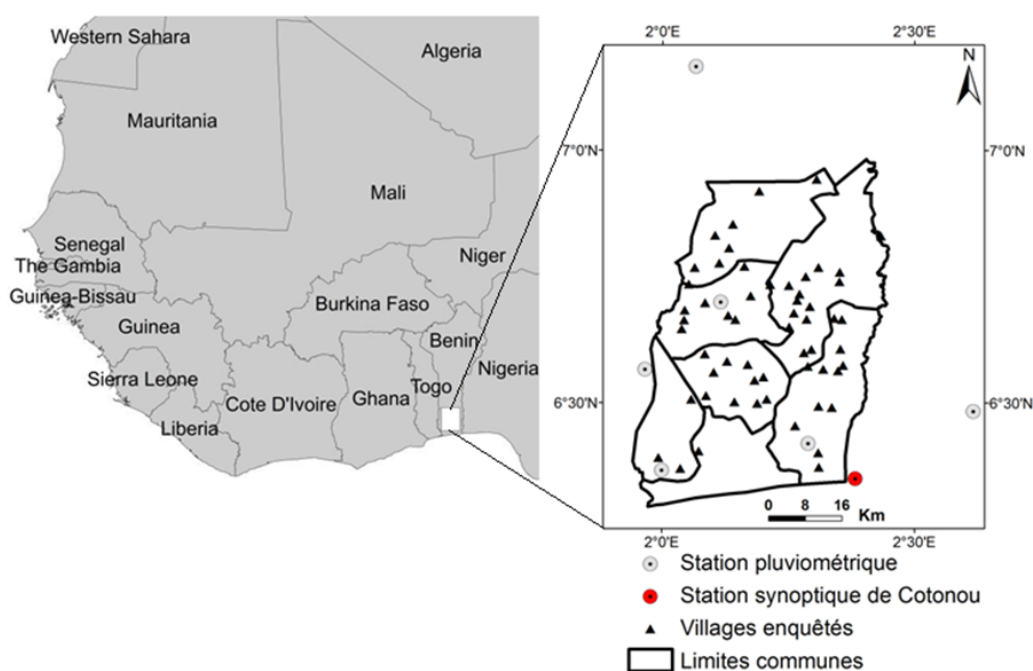


FIGURE 3.1 – Localisation du plateau d'Allada, des villages enquêtés et du réseau d'observation du climat utilisé.

L'agriculture pluviale est l'activité économique dominante dans la zone d'étude. Les principales cultures vivrières sont le maïs, le manioc et des légumineuses telles que l'arachide et le niébé. Le maïs est toujours semé en association avec les

autres cultures vivrières, notamment le manioc (*Manihot esculenta*) et le niébé (*Vigna ugniculata*).

3.2.2 Collecte des données

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude : les données climatiques et les données socio-économiques liées à la perception et à l'adaptation aux changements climatiques des producteurs (Tableau 3.1). Les premières regroupent les données journalières de précipitations, de températures et de vitesses instantanées maximales de vent de 1951 à 2010. Ces données ont été obtenues à partir du réseau d'observation du climat de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (ASECNA) installé sur et à proximité de la région d'étude (Figure 3.1). Quant aux données socio-économiques, elles ont été collectées à partir d'un questionnaire individuel administré à 201 chefs d'exploitation (CE) répartis sur 67 villages à raison de 3 CE par village. Les 67 villages ont été choisis avec une probabilité proportionnelle à la taille de leurs populations agricoles et les 3 exploitations ont été choisies au hasard dans chaque village.

TABLE 3.1 – Caractéristiques des données utilisées

Type de données	UE	Nombre UE	Période de référence
Précipitations	SP + SSC	7	1951-2010
Températures	SSC	1	1953-2010
Vitesses de vents	SSC	1	1961-2010
Socioéconomiques, perceptions et adaptations	CE	201	2010

Légende : UE = unité d'échantillonnage ; CE = chef d'exploitation ; SP = stations pluviométriques ; SSC = station synoptique de Cotonou

3.2.3 Analyse des données

Analyse des précipitations journalières

Pour analyser la variabilité interannuelle des pluies, l'indice de pluie standardisé (IPS) a été utilisé (Ali et Lebel, 2008). Il indique si l'année peut être qualifiée d'excédentaire ($IPS > 0$) ou de déficitaire ($IPS < 0$).

$$IPS_i = \frac{P_R^I - \bar{P}_R}{\sigma_R} \quad (3.2.1)$$

où, IPS_i est l'indice pluviométrique régional de l'année I , P_R^I est la pluie moyenne régionale de l'année I , \bar{P}_R est la moyenne interannuelle de la pluie régionale et σ_R est l'écart-type de la pluie régionale \bar{P}_R . Les pluies journalières régionales ont été obtenues par krigeage à partir des 7 stations pluviométriques retenues pour cette étude. A cet effet, un modèle de variogramme de type exponentiel de pépité 0.3, de portée 53 km et de palier 0.9 a été utilisé.

Pour analyser la variabilité pluri-décennale des pluies, la période de mesure (1951-2010) a été scindée en trois sous-périodes sur la base des études antérieures réalisées en Afrique de l'Ouest (Le Barbé et *al.*, 2002 ; Balme et *al.*, 2006 ; Ali et Lebel, 2008 ; Sané et *al.*, 2008). Il s'agit de la sous-période avant la rupture climatique située au début des années 1970 : 1951-1970 (P1), de la sous-période sèche comprise entre 1971 et 1990 (P2) et de la sous-période récente 1991-2010 (P3). C'est sur cette base que les modifications du cycle saisonnier et de la distribution temporelle des pluies ont été analysées.

Les modifications du cycle saisonnier ont été analysées en comparant les cycles saisonniers moyens des pluies sur la région (moyenne glissante sur 11 jours des pluies journalières régionales), pour les trois périodes P1, P2 et P3.

Pour caractériser la distribution temporelle des pluies pendant la saison des pluies, une analyse fréquentielle des séquences sèches a été effectuée. Dans cette étude, la séquence sèche est définie comme un ensemble de jours secs ($pluie < 1$ mm, (Moron et *al.*, 2007)) consécutifs. Sur cette base, quatre classes de séquences sèches ont été constituées en adoptant la classification proposée par Sané et *al.*, (2008) : *i*) séquences sèches de durées comprises entre 1 et 3 jours, *ii*) séquences sèches de durées comprises entre 4 et 7 jours, *iii*) séquences sèches de durées comprises entre

8 et 14 jours et *iv*) séquences sèches de durées supérieures à 14 jours. Pour chacune des sous-périodes (P1, P2 et P3), un échantillon regroupant toutes les séquences sèches observées sur chacune des 7 stations pluviométriques a été constitué. À partir de cet échantillon, les fréquences des 4 classes de durées de séquences sèches ont été calculées.

Enfin, l'évolution des dates de début et de fin des saisons des pluies a été analysée à partir de la méthode élaborée par Erpicum et *al.* (1988). Ces auteurs ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie (*pluie* > 1 mm) au cours d'une pentade (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une pentade. Cette méthode a déjà été implémentée en régions sahélienne (Ozer et Erpicum, 1995 ; Ozer et *al.* 2009) et guinéenne (Kouassi et *al.* 2010).

Analyse des températures et des vitesses instantanées maximales de vents

Pour analyser les fluctuations interannuelles des températures moyennes journalières, nous avons d'abord calculé leurs moyennes mensuelles pour chaque année. Ces moyennes mensuelles ont ensuite été traduites sous forme d'indice I.

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (3.2.2)$$

où, pour un mois donné, X_i est la moyenne mensuelle des températures moyennes journalières de l'année i , \bar{X} et σ sont respectivement la moyenne et l'écart-type interannuel de la série des moyennes mensuelles des températures moyennes journalières. La même démarche méthodologique a été appliquée aux vitesses instantanées maximales journalières de vents pour analyser leurs fluctuations interannuelles.

Analyse des perceptions et adaptations des producteurs face aux changements climatiques

La notion de perception se réfère au rapport des producteurs au réel qui est nécessairement subordonné à l'ensemble des manifestations apparentes du climat (Ouédraogo et *al.*, 2010). De ce fait, les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques peuvent être influencées par l'âge. En outre, l'âge du producteur peut être un indicateur de maturité dans son habileté à adopter des mesures d'adaptation (Rahman, 2003). Ainsi, sur la base de leur âge, les producteurs ont été regroupés en trois classes : *i*) les producteurs ayant moins de 41 ans qualifiés de « jeunes », *ii*) les producteurs ayant entre 41 ans et 55 ans qualifiés d'« adultes » et les producteurs ayant plus de 55 ans qualifiés d'« âgés ». Pour chaque classe de producteurs, les pourcentages de réponses aux questions relatives à leur perception des changements climatiques ont été calculés.

Un test de comparaison de pourcentages de khi-2 (χ^2) a ensuite été réalisé pour vérifier les hypothèses suivantes au seuil de risque de 5% :

- H_0 : la perception des changements climatiques est indépendante de l'âge des producteurs ;
- H_1 : la perception des changements climatiques dépend de l'âge des producteurs.

Soit $\chi^2_{th}=5.99$, la valeur critique du test pour un seuil de risque de 5% et un degré de liberté égale à 2 (2 modalités de réponse et 3 classes de producteurs). H_0 sera acceptée si la valeur de χ^2_{cal} est inférieure à χ^2_{th} (5.99), et rejetée dans le cas contraire.

La même classification suivant l'âge des producteurs a été utilisée pour analyser l'adoption des mesures d'adaptation par les producteurs. Pour chaque classe, le nombre de producteurs ayant adopté une mesure d'adaptation donnée a été calculé. Le tableau de contingence obtenu a été soumis à l'analyse factorielle des correspondances simples (AFC).

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Modifications du régime pluviométrique

Variabilité interannuelle du cumul pluviométrique

Le régime pluviométrique de la zone d'étude (Figure 3.2) est caractérisé par une forte variabilité interannuelle, contrairement au Sahel où les fluctuations de basses fréquences dominent (Le Lay et Galle, 2005). En effet, l'alternance de longues périodes humides et sèches sur la région d'étude est souvent perturbée par des fluctuations interannuelles. Toutefois, la première moitié des années 1980 a été systématiquement sèche. Cette séquence de six années sèches (IPS < 0) a également été observée au nord du Bénin (Le Lay et Galle, 2005 ; Lawin et *al.* 2011). A partir des années 1990, un autre mode de variabilité interannuelle semble s'instaurer sur la région d'étude où la succession d'années sèches est plus souvent intercalée d'années humides (IPS > 0). Ceci contraste avec la forte occurrence des années humides de la période d'avant 1970 et de celle des années sèches entre 1971 et 1990. Ainsi, comme au Sahel (Balme et *al.* 2006), ce nouveau mode de variabilité interannuelle des pluies plaide pour distinguer la période 1991-2010 des périodes 1951-1970 et 1971-1990.

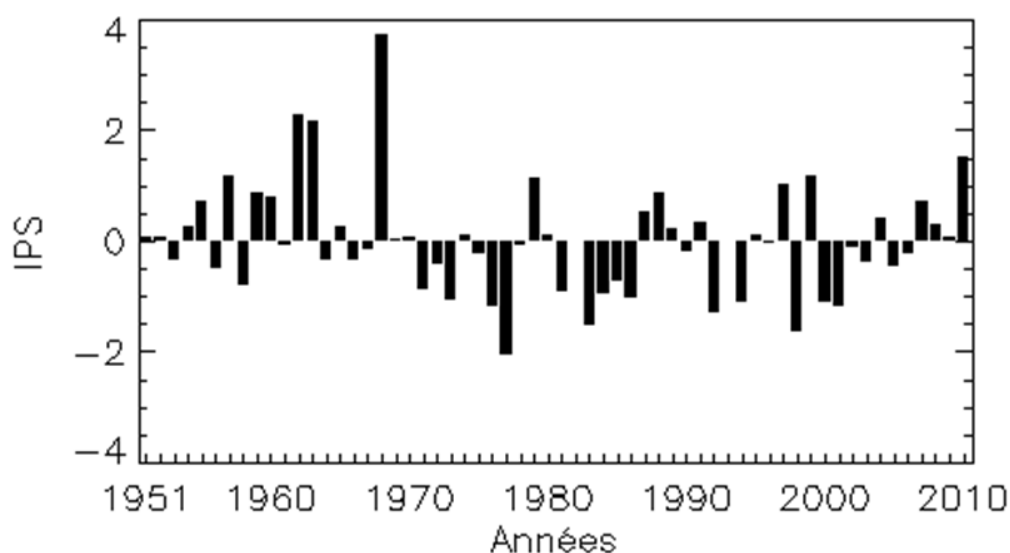


FIGURE 3.2 – Variabilité interannuelle des pluies sur le plateau d'Allada entre 1951 et 2010.

Modification du cycle saisonnier des pluies

La figure 3.3 présente les cycles saisonniers moyens des pluies sur la région d'étude (fenêtre glissante de 11 jours (J-5 à J+5)), pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3).

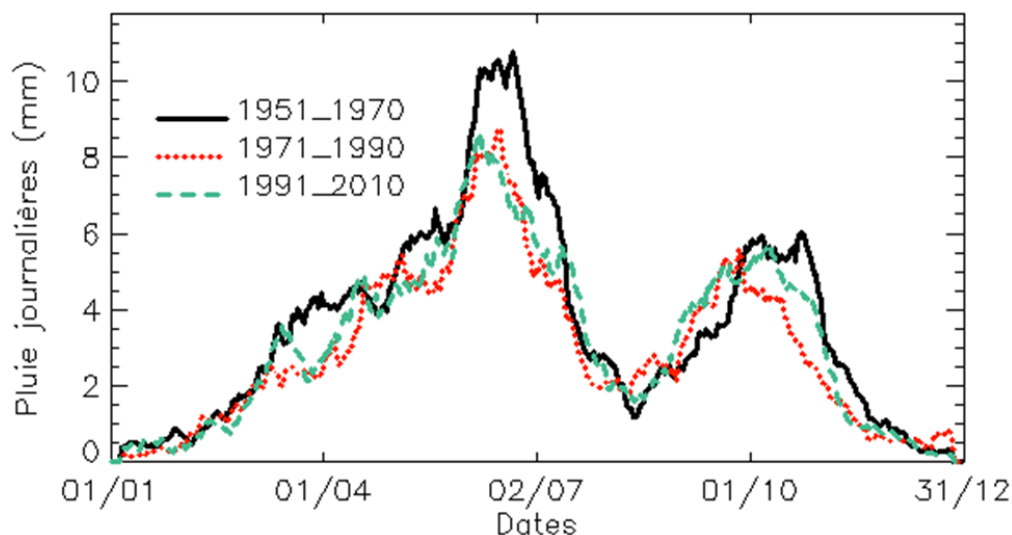


FIGURE 3.3 – Cycles saisonniers moyens des pluies journalières sur le plateau d'Allada pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3). Les valeurs sont des moyennes glissantes sur une fenêtre de 11 jours : de J-5 à J+5.

En comparaison avec P1, on observe après 1970, d'une part, un déficit pluviométrique qui touche le début (mars-avril) et le cœur de la grande saison des pluies (juin) et la fin de la petite saison des pluies (octobre-novembre) et d'autre part, un excédent pluviométrique au début de la petite saison des pluies (septembre). Par rapport à P2, un retour de conditions plus humides s'observe vers la fin de la petite saison des pluies (octobre-novembre) après 1990 (Figure 3.3).

Il apparaît que les modifications de forçage atmosphérique responsables de la forte occurrence d'années sèches depuis 1970 ont également influé sur la dynamique saisonnière des pluies sur la région d'étude, modifiant ainsi l'équilibre pluviométrique précédemment établi entre les deux saisons pluvieuses. Un constat similaire a été fait à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne par Servat et *al.* (1999).

Le tableau 3.2 résume l'évolution des caractéristiques saisonnières des pluies : le cumul saisonnier, le nombre de jours pluvieux et le cumul moyen des jours pluvieux. Quelle que soit la caractéristique considérée, un déficit relatif a été observé entre 1971-1990 par rapport à la période antérieure sur les deux saisons pluvieuses. Les variations du cumul saisonnier calculées pour la grande saison (-20%) et la petite saison (-17%) des pluies sont cohérentes au regard des résultats de Le Barbé *et al.*, (2002) qui montrent un déficit de -20% sur l'ensemble du Bénin entre 1950-1970 et 1971-1990. En outre, comme l'avait souligné Servat *et al.* (1999), la grande saison des pluies a été plus affectée que la petite saison, par le déficit pluviométrique. Entre 1971-1990 et 1991-2010, on observe une augmentation du cumul saisonnier sur les deux saisons des pluies (7% et 17%) mais le nombre de jours pluvieux de la grande saison des pluies demeure déficitaire (-3%) alors que celui de la petite saison a augmenté de 7%. Par ailleurs, on observe, à partir de 1990, une augmentation du cumul moyen des jours pluvieux qui fait que le niveau du cumul saisonnier dépasse celui d'avant 1970 sur les deux saisons des pluies.

TABLE 3.2 – Evolution du cumul saisonnier, du nombre de jours pluvieux et du cumul moyen des jours pluvieux de la grande saison des pluies (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) entre 1951-1970 et 1971-1990 (P1/P2), entre 1971-1990 et 1991-2010 (P2/P3) et entre 1951-1970 et 1991-1990 (P1/P3) sur le plateau d'Allada.

Saisons	Cumul saisonnier			Nombre de jours pluvieux			Nombre de jours pluvieux		
	P1/P2	P2/P3	P1/P3	P1/P2	P2/P3	P1/P3	P1/P2	P2/P3	P1/P3
GSP	-20%	7%	-15%	-12%	-3%	-15%	-9%	10%	1%
PSP	-17%	17%	-3%	-14%	7%	-8%	-4%	9%	5%

Légende : GSP = grande saison des pluies, PSP = petite saison des pluies

Variabilité pluri-décennale des séquences sèches

Il ressort de l'analyse du tableau 3.3 qu'entre 1951-1970 et 1971-1990, la fréquence des séquences sèches de durées inférieures à 3 jours a diminué (39% à 32%) alors que celle des séquences sèches de durées supérieures à 3 jours a augmenté (28% à

36%) pendant la grande saison des pluies. Sur cette même période, la petite saison des pluies a enregistré une diminution de la fréquence des séquences sèches de durées inférieures à 14 jours (36% à 30%) et une augmentation de la fréquence des séquences sèches de durées supérieures à 14 jours (de 26% à 42%). Ces évolutions traduisent une augmentation de la durée moyenne des séquences sèches de la grande saison et de la petite saison des pluies entre 1951-1970 et 1971-1990. Ces résultats confirment ceux de Agbossou *et al.*, (2012) qui ont montré une augmentation générale de la probabilité d'occurrence de deux décades sèches consécutives entre 1951-1970 et 1971-1990 sur l'ensemble du Bénin.

TABLE 3.3 – Evolution des séquences sèches de la grande saison (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada.

Classe de durées	GSP			PSP		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Entre 1 et 3 jours (%)	39	32	29	36	30	34
Entre 4 et 7 jours (%)	33	33	34	36	34	30
Entre 8 et 14 jours (%)	28	35	37	34	32	34
Supérieurs à 14 jours (%)	28	36	36	26	42	32

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies

Cette augmentation de la durée moyenne des séquences sèches s'est poursuivie après 1990 sur la grande saison des pluies alors qu'elle semble régresser sur la petite saison des pluies (Tableau 3.3). En effet, l'augmentation et la diminution des fréquences des séquences sèches de durées respectivement supérieures et inférieures à 3 jours ont continué après 1990 sur la grande saison des pluies. Par contre, c'est la tendance inverse qui s'observe sur la petite saison des pluies. Cette évolution des séquences sèches est logiquement en phase avec celle du nombre de jours pluvieux (Tableau 3.2).

Evolution pluri-décennale des dates de début et fin des saisons des pluies

L'analyse de l'évolution des dates de début et de fin des saisons des pluies (Tableau 3.4) montre qu'entre 1951-1970 et 1971-1990, la grande et la petite saison des pluies ont raccourci respectivement de 30 jours (lié à un début tardif) et de 10 jours (lié à une fin tardive). Entre 1971-1990 et 1991-2010, on observe un allongement des saisons des pluies qui est particulièrement marqué pour la petite saison des pluies (Tableau 3.4).

TABLE 3.4 – Evolution des dates de début et de fin de la grande saison (mars-juillet) et de la petite saison des pluies (septembre-novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada.

Paramètres	GSP			PSP		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Début	16/03	15/04	10/04	07/09	07/09	02/09
Fin	09/07	09/07	14/07	27/10	17/10	27/10
Longueur	115	85	95	50	40	55

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies

3.3.2 Evolution des températures moyennes journalières et des vitesses instantanées maximales journalières des vents

L'analyse de la figure 3.4 montre une tendance à la hausse (de $I_i < 0$ vers $I_i > 0$) des températures moyennes journalières entre 1953 et 2010 quel que soit le mois considéré. Ces résultats confirment ceux de Gnanglè et *al.* (2011) qui montrent que les températures journalières ont augmenté de plus de 1°C sur tout le Bénin entre 1960 et 2008, soit un taux d'accroissement annuel de 0.03°C.

Les variations interannuelles des vitesses instantanées maximales des vents entre 1961 et 2010 (Figure 3.5) indiquent une tendance à la baisse (de $I_i > 0$ vers $I_i < 0$) de ces dernières, indépendamment du mois considéré. Ce résultat traduit un affaiblissement général des vents sur la région d'étude.

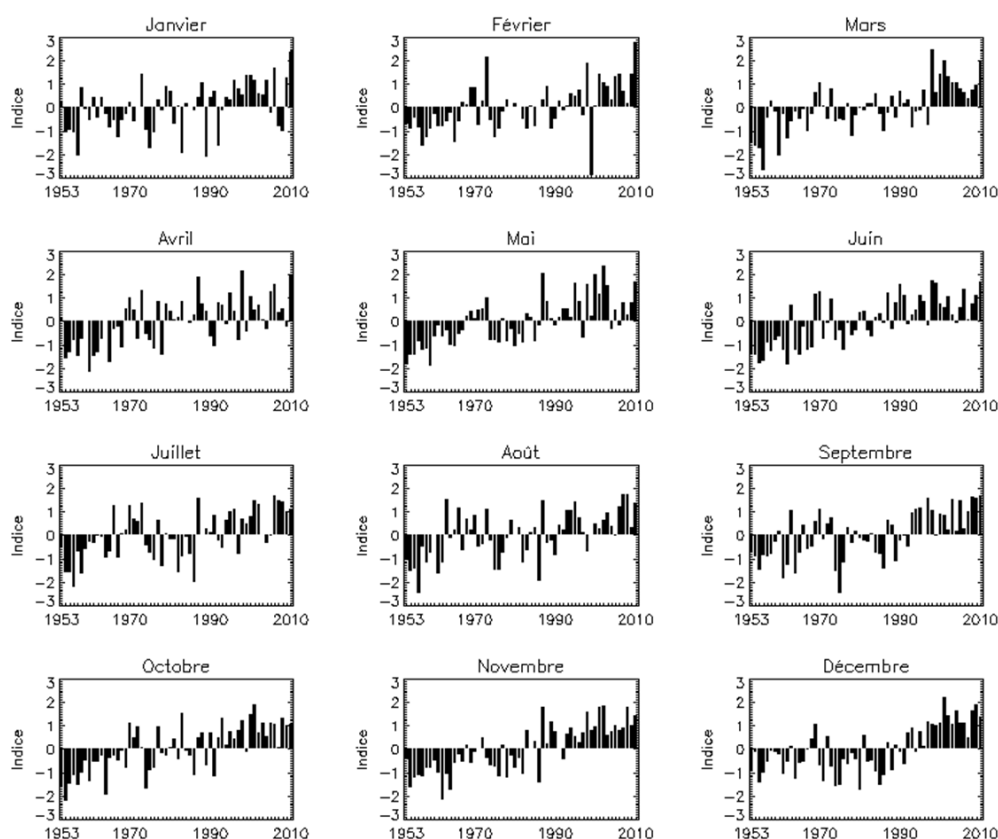


FIGURE 3.4 – Variabilité interannuelle des températures sur le plateau d'Allada entre 1953 et 2010

3.3.3 Perceptions et adaptations des producteurs face aux changements climatiques

Caractéristiques des exploitations enquêtées

Les principales caractéristiques des exploitations enquêtées sont présentées dans le tableau 3.5. Les chefs d'exploitation (CE) interviewés ont une moyenne d'âge de 51 ans avec 27 ans d'expériences en tant que chefs d'exploitation. Ils ont vécu en moyenne 41 ans dans leur village. Ils sont donc en mesure d'appréhender les changements climatiques avec pertinence dans leur localité. Les exploitations sont exclusivement manuelles. En conséquence, 92% des CE ont recours à la main d'œuvre salariée pour effectuer les travaux champêtres tels que le sarclage, le labour, le semis, le nombre d'actifs agricoles par exploitation étant faible (3 ± 2).

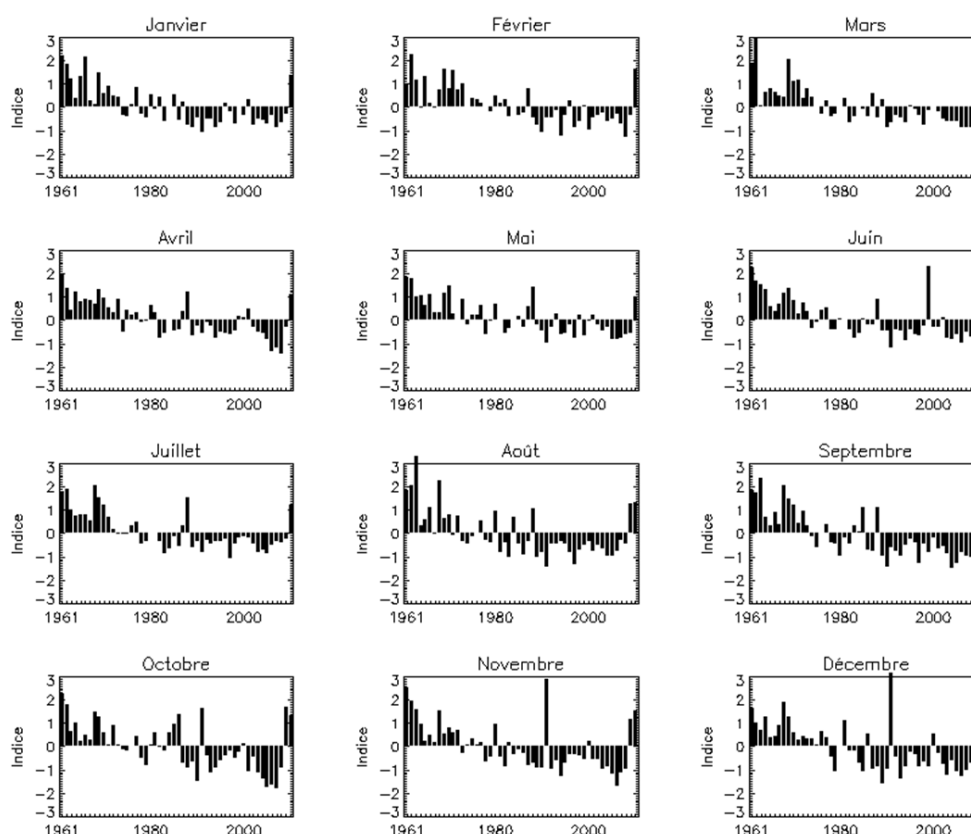


FIGURE 3.5 – Variabilité interannuelle des vitesses instantanées maximales des vents sur le plateau d'Allada entre 1961 et 2010

Perceptions des producteurs des changements de précipitations

Les perceptions paysannes des changements de précipitations sont résumées dans les tableaux 3.6 et 3.7. Elles se réfèrent à une évolution récente du climat. En effet, les chefs d'exploitations (CE) « jeunes » (moins de 41 ans), « adultes » (entre 41 et 55 ans) et « âgés » (plus de 55 ans) situent le début des changements des précipitations respectivement autour de l'an 2000 ± 4 , 2000 ± 5 et 1992 ± 10 . L'épisode de sécheresse des années 1970 et 1980 qui a touché toute l'Afrique de l'Ouest (Le Barbé et *al.*, 2002) semble ne pas être un événement majeur ayant marqué le vécu des producteurs.

Les perceptions des producteurs ont le plus souvent trait à la mauvaise répartition des pluies, à leur intensification et au déficit pluviométrique. Il s'agit de la diminution du nombre de jours pluvieux, de l'augmentation de la durée et de la fréquence

TABLE 3.5 – Caractéristiques des exploitations agricoles enquêtées

Caractéristiques des exploitations agricoles	Eff. ou %
Pourcentage d'exploitations en culture manuelle (%)	100
Nombre moyen d'outils manuels par exploitation	3±2
Nombre moyen d'actifs agricoles par exploitation	3±2
Surface cultivée totale moyenne par exploitation (ha)	5±7
Pourcentage de chefs d'exploitation qui ont recours à la main d'œuvre salariée (%)	92
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant l'agriculture comme activité principale (%)	94
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant une activité secondaire (%)	84
Pourcentage de chefs d'exploitation non scolarisés (%)	44
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant un niveau d'enseignement primaire (%)	37
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant un niveau d'enseignement secondaire (%)	17
Pourcentage de chefs d'exploitation de sexe masculin (%)	94
Pourcentage de chefs d'exploitation de sexe féminin (%)	6
Age moyen des chefs d'exploitation (années)	51±11
Nombre moyen d'années passées à la tête de l'exploitation	27±10
Nombre moyen d'années passées dans le village par les chefs d'exploitation	41±16

des séquences sèches, de l'augmentation du cumul moyen des jours pluvieux, de la diminution du cumul saisonnier et du raccourcissement des saisons des pluies. Ce raccourcissement se manifeste, soit par le retard des pluies pour la grande saison des pluies, soit par arrêt précoce des pluies pour la petite saison des pluies. Les résultats du test de χ^2 au seuil de risque de 5% conduisent à accepter l'hypothèse H_0 , selon laquelle : les perceptions des changements climatiques sont indépendantes

de l'âge des producteurs, sauf dans le cas du retard des pluies de la grande saison. Dans ce cas, la perception des CE «jeunes» a été significativement différente de celle des autres CE (Tableau 3.6). En effet, à ce niveau, la perception apparaît tranchée chez les CE «adultes» et les CE «âgés» alors qu'elle est mitigée chez les CE «jeunes». Ceci peut s'expliquer par le fait qu'entre 1971-1990 et 1991-2010, les dates de démarrage de la grande saison des pluies ont peu varié en comparaison avec la variation qu'elles ont connue entre 1951-1970 et 1971-1990 (Tableau 3.4).

TABLE 3.6 – Perceptions des producteurs des changements de précipitations de la grande saison des pluies.

variables	Augmentation/précocité			Diminution/tardiveté			χ^2
	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	
P	38	36	33	62	64	77	0.23
H	61	59	69	39	41	31	1.78
N	43	27	27	57	73	73	2.87
Fss	70	74	68	30	26	32	0.53
Dss	59	69	75	41	31	25	2.48
Déb	47	24	22	53	76	77	7.29*
Fin	55	51	58	45	49	42	0.74

Légende : * = perception des changements est liée à l'âge des producteurs ; P = cumul pluviométrique ; H = cumul moyen des jours pluvieux ; Fss = fréquence des séquences sèches ; Dss = durées des séquences sèches ; Déb = début saison pluvieuse ; Fin = fin saison pluvieuse

Les perceptions des producteurs des changements des précipitations rapportées dans cette étude sont similaires à celles relatées par d'autres auteurs (Ouédraogo et al. 2010 ; Agossou et al. 2012 ; Kizauzi et al. 2012 ; Macharia et al. 2012 ; Moyo et al. 2012, Tambo et Abdoulaye, 2012). Elles corroborent les résultats climatologiques, notamment la diminution du nombre de jours pluvieux, la forte occurrence des séquences sèches, l'intensification des pluies journalières et le raccourcissement des saisons des pluies. Les résultats montrent également que les CE «jeunes» sont

TABLE 3.7 – Perceptions des producteurs des changements de précipitations de la petite saison des pluies.

variables	Augmentation/précocité			Diminution/tardiveté			χ^2
	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	
P	65	43	46	35	57	54	3.61
H	78	53	51	22	47	49	5.59
N	35	35	28	65	65	72	0.75
FSS	71	62	76	30	38	24	3.14
DSS	64	64	76	36	36	24	2.68
DEB	47	64	52	53	36	48	4.14
FIN	53	62	75	47	38	25	4.78

Légende : idem que tableau 3.6

moins sensibles que les CE « adultes » et les CE « âgés », aux changements de précipitations entre 1951-1970 et 1971-1990, en l'occurrence le retard des pluies de la grande saison.

Perceptions des producteurs des changements de températures et de vitesses de vents

Le tableau 3.8 résume les perceptions des producteurs des changements de températures journalières. Elles sont indépendantes de l'âge des producteurs d'après le test de χ^2 au seuil de risque de 5%. Les producteurs mettent en relief l'augmentation des températures pendant les saisons sèches et leur diminution pendant les saisons pluvieuses.

En ce qui concerne les vents (Tableau 3.9), l'ensemble des producteurs estiment qu'ils sont plus forts pendant la grande saison des pluies et plus faibles pendant la petite saison sèche. Par ailleurs, les CE « jeunes » citent souvent l'affaiblissement des vents pendant la grande saison sèche et la petite saison des pluies alors que le reste des CE ont une opinion contraire. Toutefois, ces différences ne sont pas statistiquement significatives au seuil de risque de 5% d'après le test de χ^2 .

TABLE 3.8 – Perceptions des producteurs des changements de températures journalières.

variables	Augmentation			Diminution			χ^2
	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	
GSS	89	95	93	11	5	7	1.10
GSP	48	36	44	52	64	56	1.59
PSS	65	65	74	35	35	26	1.17
PSP	52	34	34	48	66	66	2.95

Légende : GSS = grande saison sèche ; GSP = grande saison pluvieuse ; PSS = petite saison sèche ; PSP = petite saison pluvieuse

TABLE 3.9 – Perceptions des producteurs des changements des forces des vents journaliers.

variables	Augmentation			Diminution			χ^2
	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	
GSS	43	53	58	57	47	42	1.28
GSP	56	73	76	44	27	24	3.41
PSS	35	37	39	65	63	61	0.08
PSP	36	58	61	64	42	39	4

Légende : GSS = grande saison sèche ; GSP = grande saison pluvieuse ; PSS = petite saison sèche ; PSP = petite saison pluvieuse

D'une manière générale, le fait que les producteurs perçoivent une diminution des températures journalières et une augmentation des forces des vents pendant les saisons des pluies constitue un « écart » de perception par rapport aux observations climatiques (Figures 3.4 et 3.5). Cet écart peut influencer l'orientation des stratégies agricoles. En effet, plusieurs auteurs (Bankoff et *al.* 2003 ; Lallau, 2008 ; Ouédraogo et *al.* 2010 ; O'Brien et *al.* 2010 ; Agossou et *al.* 2012 ; Kpadonou et *al.* 2012) mettent en exergue une relation de dépendance entre les stratégies et capacités d'adaptation et les perceptions des changements climatiques des producteurs.

Perceptions des producteurs des causes des changements climatiques

La principale cause des changements climatiques évoquée par les producteurs est la déforestation (Tableau 3.10). Les perceptions de ces causes ne sont pas liées à l'âge des producteurs, d'après les résultats du test de χ^2 au seuil de risque de 5%. Les causes des changements climatiques citées par les producteurs dans cette étude sont similaires à celles citées par Tambo et Abdoulaye (2012) et Kisauzi et *al.* (2012). Le fait que les producteurs citent la déforestation comme principale cause des changements climatiques signifie qu'ils perçoivent le rôle déterminant du couvert végétal sur le climat, comme l'ont rapporté Charney et *al.* (1977) et Zheng et Eltahir (1999).

TABLE 3.10 – Perceptions des producteurs des causes de changements climatiques.

Causes	Jeunes (%)	Adultes (%)	Agés (%)	χ^2
Déforestation	60	70	70	1.23
Non respect de la tradition	13	28	37	5.89
Blocage des pluies par incantations	20	16	21	0.69
Croissance démographique	13	6	3	3.52
Punition divine	0	5	8	2.68
Pollution par les gaz d'échappement	0	5	5	1.46

Conséquences des changements climatiques

Selon les producteurs, les changements climatiques ont des effets néfastes sur leurs activités agricoles, leur santé et leurs milieux de vie (Vissoh et *al.*, 2012). Sur le plan agricole, l'ensemble des producteurs ont constaté que les rendements agricoles ont baissé, notamment ceux du maïs. Ce constat confirme celui de Vissoh et *al.*, (2012), qui montrent que les pertes de rendement du maïs peuvent atteindre 75%. Les producteurs citent également l'émergence des vers de terre et des rongeurs à des périodes inhabituelles du fait de la forte occurrence des poches de sécheresse. Par ailleurs, les producteurs citent souvent la verse des plantes comme conséquence

de l'augmentation des forces des vents.

Sur le plan sanitaire, les producteurs ont remarqué une hausse du taux des personnes souffrant de paludisme, qui serait favorisée par la hausse des températures. Ceci confirme les résultats de Githeko *et al.*, (2000), qui estiment que le réchauffement du climat pourrait avoir une influence directe sur l'épidémiologie des maladies à transmission vectorielle, dont le paludisme dans les régions tropicales et subtropicales.

Quant à leur milieu de vie, les producteurs constatent une augmentation de la fréquence de l'arrachage des toitures des maisons et de l'effondrement des maisons en terre de barre du fait des vents violents et des inondations. Il convient de noter que les inondations ne sont pas des faits nouveaux pour les producteurs. Cependant, elles surviennent avec plus d'ampleur à des périodes et endroits inhabituels.

Mesures d'adaptation des producteurs aux changements climatiques

Les populations locales ont su développer au fil du temps, une remarquable capacité à s'adapter aux menaces climatiques (Kpadonou *et al.* 2012). Les principales mesures d'adaptation adoptées par les CE sont résumées dans le tableau 3.11. Il s'agit de la modification des dates de semis, l'adoption de nouvelles variétés de maïs à cycle plus court (90 jours au lieu de 120 jours) et de nouvelles cultures, la pratique du labour et de la fertilisation du sol et l'initiation d'activités secondaires.

Les résultats de l'analyse factorielle des correspondances simple (AFC) réalisée sur les mesures d'adaptation (Figure 3.6) montrent que les producteurs adoptent différentes stratégies d'adaptation selon leur âge. Les CE « jeunes » adoptent une mesure d'adaptation (culture) sensiblement différente de celles des CE « adultes » et « âgés ». Les CE « jeunes » préfèrent abandonner les cultures de céréales, très sensibles aux aléas climatiques, pour des cultures de rentes telles que l'ananas, la banane et la patate douce. Par ailleurs, les producteurs « adultes », contrairement aux producteurs « âgés », modifient leurs dates de semis et pratiquent une activité secondaire. Ceci montre qu'en plus d'adapter leurs techniques culturales aux changements climatiques, les CE « adultes » pratiquent également d'autres activités pour compenser la baisse du revenu agricole due aux effets de ces changements.

TABLE 3.11 – Principales mesures d'adaptation individuelles des chefs d'exploitation

Mesures d'adaptation	Raisons
Modification de la date de semis	Les semis sont retardés de trois à quatre semaines par rapport à la date habituelle et échelonnés sur la même parcelle pour limiter les pertes de semences liées aux poches de sécheresse
Adoption de nouvelles variétés de maïs à cycle plus court	Les producteurs abandonnent les variétés de maïs de cycle long (de 110 à 120 jours) au profit de variétés de cycle plus court (de 75 à 90 jours) en raison du raccourcissement des saisons des pluies
Fertilisation du sol	L'engrais (NPK, urée) est davantage utilisé en raison de l'appauvrissement des terres dû à leur mise en culture permanente
Pratique du labour	Le sol est labouré pour augmenter sa fertilité physique
Initiation d'activités secondaires	les CE s'adonnent à des activités génératrices de revenu telles que : le taxi-moto, la fabrication de charbon de bois, la transformation agroalimentaire, la pêche, l'élevage ...
Adoption de nouvelles cultures	De nouvelles cultures de rente (ananas, bananes, patate douce) sont adoptées aux dépens des céréales trop sensibles aux séquences sèches

Par contre, les producteurs « âgés » adaptent uniquement leur technique culturale en pratiquant le labour. En effet, l'initiation d'activités secondaires nécessite une certaine mobilité et un effort physique que les producteurs « âgés » n'ont plus.

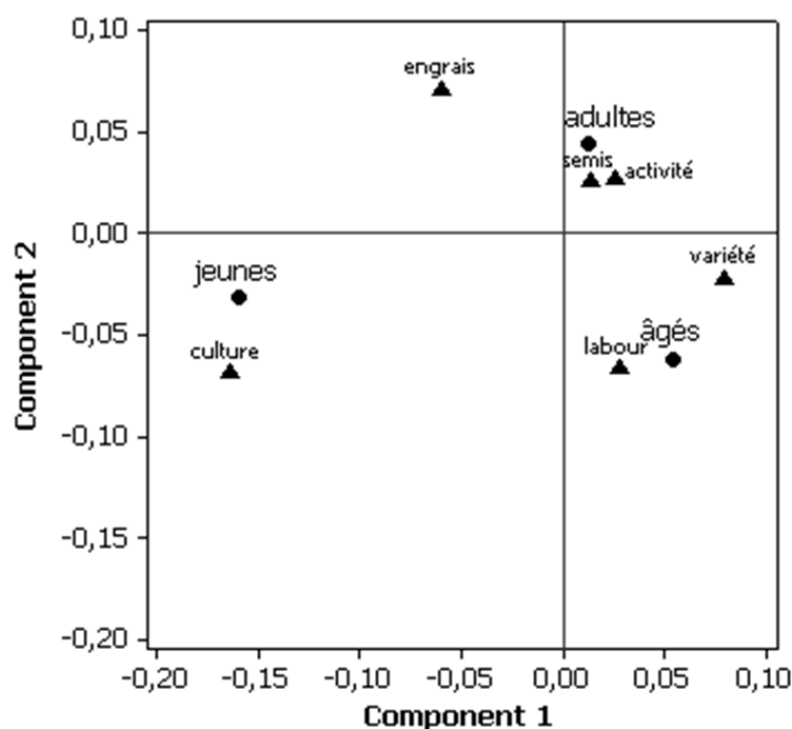


FIGURE 3.6 – Adaptations face aux changements climatiques : projection des trois classes de chef d'exploitation (CE) dans le système d'axes factoriels à l'issue d'une analyse factorielle des correspondances simple (AFC).

Légende : jeunes = CE ayant moins de 41 ans, adultes = CE ayant entre 41 et 55 ans, âgés = CE ayant plus de 55 ans, semis = modification de la date de semis, variété = utilisation de nouvelles variétés de maïs, labour = pratique du labour, engrais = utilisation d'engrais, activité = initiation d'activité secondaire, culture = adoption de nouvelles cultures.

3.4 Conclusion de chapitre

L'approche utilisée a permis de mettre en évidence la cohérence entre les changements climatiques et les perceptions des producteurs, notamment en ce qui concerne la dégradation de la qualité des saisons des pluies et leur raccourcissement, le réchauffement climatique et l'affaiblissement des vents. Toutefois, l'âge des producteurs a parfois influencé leur perception des changements climatiques. A ce sujet, quelques écarts existent entre les perceptions des producteurs « jeunes » et celles des autres producteurs. Les « jeunes » producteurs ont une perception mitigée du retard des pluies pendant la grande saison alors que le reste des producteurs en ont une perception tranchée. En outre, des écarts subsistent également entre les per-

ceptions des producteurs et les observations climatiques. En effet, le réchauffement climatique et l'affaiblissement des vents ne sont pas perçus par les producteurs sur toutes les saisons de l'année, comme l'ont montré les résultats climatologiques.

Les mesures d'adaptation adoptées par les producteurs sont également fonction de leur âge : les CE « jeunes » ont préférentiellement adopté de nouvelles cultures, les CE « adultes » ont essentiellement adopté, en plus de la modification des dates de semis, des activités secondaires telles que la conduite de taxi-moto, la fabrication de charbon de bois et la pêche, alors que les CE « âgés » ont modifié leurs techniques culturales en pratiquant le labour. Toutefois, si certaines mesures d'adaptation sont en phase avec les changements climatiques (labour, modification des dates de semis, changement de cultures), d'autres, telles que l'initiation d'activités secondaires comme la fabrication de charbon de bois, sont susceptibles d'engendrer des pressions sur les ressources naturelles, aggravant ainsi les impacts des changements climatiques.

Le fait que les producteurs « adultes » perçoivent le retard des pluies de la grande saison et, en conséquence, modifient leurs dates de semis, peut traduire l'existence d'un réel lien entre les perceptions des producteurs et leur décision d'adopter une mesure d'adaptation donnée. Dans ce contexte, il importe d'approfondir les études sur les perceptions qu'ont les producteurs des changements climatiques afin de comprendre, d'une part, la cause des écarts qui existent entre les perceptions et les observations climatiques et, d'autre part, le poids des perceptions dans l'adoption des mesures d'adaptation.

Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin

Ce chapitre a été publié tel qu'il suit :

Allé CSUY, Vissoh VP, Guibert H, Agbossou KE, Afouda AA, 2013. Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]* 13(3) : 1-20. URL : <http://vertigo.revues.org/14361>. DOI : 10.4000/vertigo.14361.

Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin

Résumé

L'étude a pour objectif d'analyser les perceptions paysannes de la variabilité climatique et leur pertinence par rapport aux observations climatiques. A cet effet, elle a comparé des données climatiques et des perceptions paysannes de la variabilité climatique recueillies à partir d'une enquête auprès de 201 chefs d'exploitations agricoles (CE) au Sud-Bénin. L'enquête était constituée d'entretiens collectifs et individuels, à questionnaires ouverts, semi-ouverts et fermés. Les CE sont davantage marqués par la dégradation de la qualité des saisons des pluies observée entre 1951-1970 et 1971-1990, en l'occurrence la modification des dates de début et de fin des saisons des pluies, la recrudescence des séquences sèches, la diminution du nombre de jours pluvieux et le déficit pluviométrique, que par la relative récente reprise des précipitations au cours des années 1990 et 2000 sur la région d'étude. Toutefois, le changement d'échelle, de régionale à locale, réduit sensiblement l'écart entre les perceptions paysannes et les observations climatiques. Les CE citent également la baisse des températures et l'augmentation de la fréquence des vents violents pendant les saisons pluvieuses. Ces perceptions sont contraires aux observations climatiques et suggèrent des investigations plus approfondies pour mieux comprendre ces divergences. Face à la variabilité climatique, les CE ont développé des mesures d'adaptation qui, globalement traduisent leur perception. Ceci ouvre des perspectives pour l'élaboration de stratégies d'adaptation avec une forte chance d'attirer l'intérêt des producteurs.

Mots-Clefs : Précipitation, vent, température, perception, adaptation, climat guinéen, Afrique de l'Ouest.

4.1 Introduction

La gamme de variabilités climatiques, allant de l'échelle intra-saisonnière (supérieure à 10 jours) aux échelles décennale et pluri-décennale, impacte les écosystèmes et

les activités humaines, particulièrement sur le continent africain où la dépendance des sociétés aux aléas naturels, en premier lieu pluviométriques, est la plus forte (Fontaine et *al.*, 2012). Cette situation de vulnérabilité s'illustre par le fait que depuis les années 1970, les variations inter-annuelles du climat ont contribué aux plus grandes famines ayant nécessité un recours à l'aide alimentaire internationale (Dilley et *al.*, 2005). A cette variation du climat, s'ajoutent les impacts annoncés des changements climatiques. En effet, le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), a prévu une augmentation de la température partout dans le monde ainsi que la probable exacerbation des extrêmes climatiques comme les sécheresses et les inondations. Le même rapport identifie l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques. Un tel bouleversement aura assurément des répercussions sur les ressources hydriques et sur la production agricole (CGIAR, 2009). L'enjeu est tel que, malgré les incertitudes qui entachent les projections climatiques sur l'Afrique de l'Ouest (Fontaine et *al.*, 2012), il faut d'ores et déjà réfléchir aux options d'adaptation pour réduire les impacts néfastes des aléas climatiques sur la population africaine et augmenter la sécurité alimentaire (Sultan et *al.*, 2012).

En dépit d'expériences d'adaptation aux aléas naturels (Agossou et *al.*, 2012 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Mertz et *al.*, 2009 ; Tschakert, 2007), la vulnérabilité des pays d'Afrique subsaharienne et de leurs populations à la variabilité et aux changements climatiques demeure une grande préoccupation et a suscité un intérêt scientifique considérable au cours des dernières décennies, avec des appels à une augmentation du financement pour l'adaptation (Patt et *al.*, 2010). Il s'avère que l'adoption des mesures d'adaptation est en partie déterminée ou limitée par la perception que ces populations rurales ont de la variabilité climatique (O'Brien et *al.* 2010 ; Ouédraogo et *al.*, 2010). Dans ce contexte, il est apparu essentiel d'étudier davantage la cohérence des perceptions des populations rurales de la variabilité climatique au regard des tendances climatiques observées. Ceci peut contribuer à mieux orienter les stratégies d'adaptation à la variabilité climatique. C'est ce qui justifie la présente étude qui a pour objectif d'analyser les perceptions paysannes de la variabilité inter-annuelle du climat et leur cohérence avec les observations climatiques au Sud-Bénin en région guinéenne.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Zone d'étude

La zone d'étude est le plateau d'Allada (Figure 4.1). Il est situé au Sud-Bénin entre les longitudes 1.5°E et 2.3°E et les latitudes 6.2°N et 7°N. Le régime pluviométrique est directement associé aux mouvements méridiens de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). De ce fait, il est caractérisé par deux saisons des pluies d'inégales durées : la grande saison des pluies s'étend de mars à juillet et la petite saison des pluies va de septembre à novembre. Ces deux saisons pluvieuses sont intercalées par une petite saison sèche centrée sur août et une grande saison sèche entre décembre et février. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1100 mm entre 1951 et 2010, la température moyenne journalière varie entre 25°C et 29°C et la vitesse moyenne journalière est d'environ 4 m/s entre 1961 et 2010. L'agriculture pluviale est l'activité économique dominante dans la zone d'étude. Les principales cultures vivrières cultivées sont le maïs, le manioc l'arachide et le niébé.

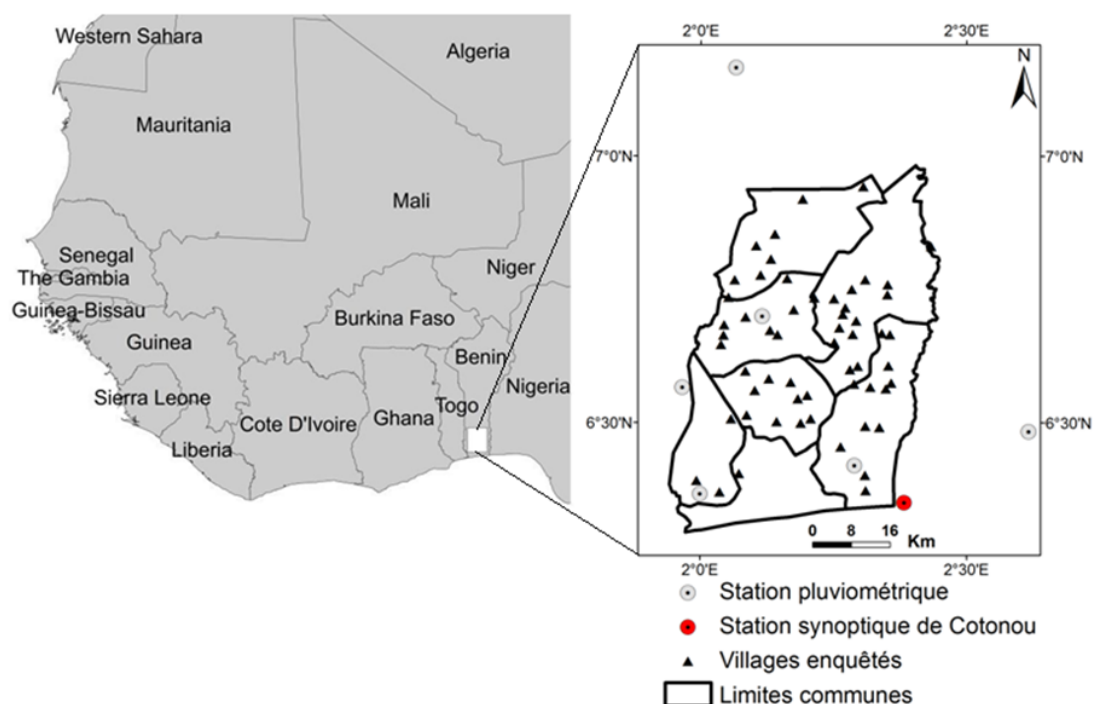


FIGURE 4.1 – Localisation de la zone d'étude, des stations climatiques et des villages étudiés.

4.2.2 Méthodologie

Deux types de données ont été utilisés dans cette étude : (i) les données climatiques et (ii) les données relatives à la perception des producteurs de la variabilité climatique. Les données climatiques concernent les données journalières de précipitations, de températures et de vitesses de vents. Elles sont issues du réseau national d'observation du climat. Ce réseau est géré par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les premières stations pluviométriques de ce réseau ont été installées sur la région d'étude depuis 1921. Cependant, c'est à partir de 1950 que ce réseau s'est densifié. L'amélioration de la qualité des données qui en a résulté, a conduit au choix de la période 1951-2010 comme période de référence pour l'étude des précipitations et des températures. Quant aux vitesses de vents, la période d'étude a été de 1961 à 2010, en raison de l'absence de données régulières de vitesses de vents avant 1960 à la station synoptique de Cotonou. Le tableau 4.1 résume les caractéristiques des stations utilisées.

TABLE 4.1 – Caractéristiques des stations pluviométriques et synoptiques étudiées. Les écart-types sont indiqués entre parenthèses

Stations	Lat	Long	Instal	Manquant	Cumul (mm)	Jp
Bohicon	7.166	2.066	1940	0	961 (199)	82 (11)
Niaouli	6.700	2.116	1941	0	1010 (229)	70 (11)
Bopa	6.566	1.966	1921	3	827 (221)	50 (10)
Porto-Novo	6.483	2.616	1921	2	1162 (285)	67 (19)
Adjohoun	6.420	2.290	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Ouidah	6.366	2.001	1921	1	1005 (305)	65 (17)
Cotonou	6.350	2.383	1952	2	1168 (316)	83 (11)

Légende : Lat = latitude (en degré décimal); Long = longitude (en degré décimal); Instal= date d'installation des statitions ; Manquant = nombre d'années manquantes entre 1951 et 2010 ; Cumu l= cumul pluviométrique moyen (1951-2010) annuel en mm ; Jp = nombre de jours pluvieux (> 1mm)

Les données relatives à la perception de la variabilité climatique des chefs d'exploitation ont été collectées en deux phases principales. La première phase a

consisté en des entretiens de groupes. Ces groupes étaient constitués d'agents de vulgarisation agricole, de chefs d'exploitation agricole et de chefs de village. Le guide d'entretien a comporté des questions ouvertes et semi-ouvertes, permettant de recueillir et de hiérarchiser les perceptions ou opinions des groupes. Cette phase a permis l'élaboration du questionnaire individuel pour la deuxième phase. La deuxième phase a consisté en l'administration du questionnaire individuel aux chefs d'exploitation agricole. Ledit questionnaire portait sur les caractéristiques socio-économiques de l'exploitation agricole, sur la perception de la variabilité climatique suivant plusieurs items recueillis au cours de la première phase. Le questionnaire a été administré à 201 chefs d'exploitation agricole (CE) répartis sur 67 villages à raison de trois CE par village (Figure 4.1). Le choix des exploitations agricoles enquêtées a été fait à partir d'un échantillonnage probabiliste basé sur un sondage à deux niveaux. Le premier niveau a consisté en la sélection des villages et le second niveau a consisté en la sélection des exploitations agricoles au sein des villages. Les 67 villages ont été choisis avec une probabilité proportionnelle (PPT) à la taille de leurs populations agricoles et les trois exploitations ont été choisies au hasard dans chaque village.

Analyse des précipitations journalières

Pour analyser la variabilité interannuelle des pluies, l'indice de pluie standardisé (IPS) a été utilisé (Ali et Lebel, 2008). Il indique si l'année peut être qualifiée d'excédentaire ($IPS > 0$) ou de déficitaire ($IPS < 0$).

$$IPS_i = \frac{P_R^I - \bar{P}_R}{\sigma_R} \quad (4.2.1)$$

où, IPS_I est l'indice pluviométrique régional de l'année I , P_R^I est le cumul de précipitation moyen régional de l'année I , \bar{P}_R est la moyenne interannuelle du cumul de précipitation au niveau régional et σ_R est l'écart-type de la pluie régionale \bar{P}_R . Les pluies journalières régionales ont été obtenues par krigeage. Le krigeage a déjà été utilisé pour déterminer le champ pluviométrique annuel régional à partir des pluies journalières ponctuelles en Afrique de l'Ouest (Le Lay et Galle, 2005 ; Ali et Lebel, 2008 ; Lawin et *al.*, 2011). Cette démarche a l'avantage de prendre en compte pour chaque jour d'observations, le meilleur réseau disponible pour le krigeage de la pluie moyenne en éliminant les stations lacunaires du jour considéré.

Pour faire le krigeage, nous avons utilisé un modèle de variogramme de type exponentiel de pépité 0.3, de portée 53 km et de palier 0.9. Ce modèle a été choisi au regard de la forme du variogramme climatologique journalier moyen brut, où on note la présence marquée d'un palier et d'une pépité (Figure 4.2). La pertinence de l'ajustement exponentiel a été évaluée en utilisant le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). Rappelons qu'un variogramme exponentiel a été déjà choisi pour calculer les moyennes spatiales de pluies journalières au Bénin (Lawin *et al.*, 2011 ; Le Lay et Galle, 2005).

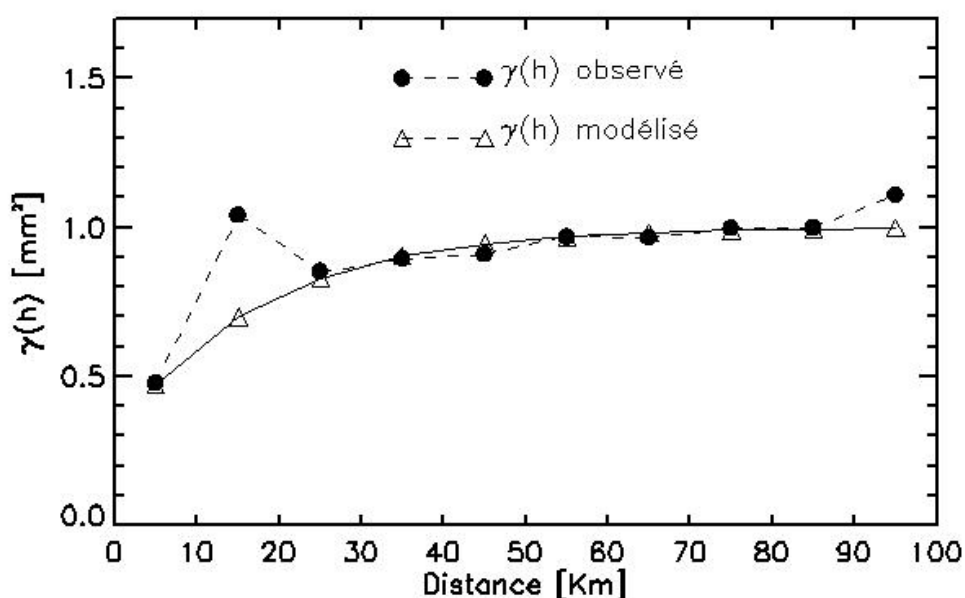


FIGURE 4.2 – Variogramme climatologique journalier moyen brut ajusté avec un modèle exponentiel.

Pour analyser la variabilité pluri-décennale des précipitations, la période d'étude 1951-2010 a été scindée en trois sous-périodes sur la base des études antérieures effectuées sur l'Afrique de l'Ouest (Ozer *et al.*, 2009 ; Ali et Lebel, 2008 ; Sané *et al.*, 2008 ; Balme *et al.*, 2006 ; Le Barbé *et al.*, 2002). Ainsi, on a (i) la période avant la rupture climatique située au début des années 1970 : 1951-1970 (P1), (ii) la période sèche comprise entre 1971 et 1990 (P2) et (iii) la période 1991-2010 (P3) qui représente un retour vers des conditions plus humides.

L'évolution des dates de début et de fin des saisons pluvieuses a également

été analysée. Il n'existe pas de critère universellement accepté pour définir le démarrage et la fin des saisons des pluies. Les définitions utilisées reposent sur des considérations subjectives qui dépendent fortement de l'utilisateur (Balme et *al.*, 2005). Dans le cas de cette étude, l'évolution des dates de début et de fin des saisons des pluies a été analysée à partir de la méthode élaborée par Erpicum et *al.* (1988). Ces auteurs ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie (pluie > 1 mm) au cours d'une pentade (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. De même, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une pentade. Cette méthode a déjà été implémentée en région guinéenne (Kouassi et *al.*, 2010).

Pour mettre en relief les questions d'échelles spatiales à considérer lorsqu'on s'intéresse aux perceptions de la variabilité pluviométrique par les producteurs agricoles, les données brutes de précipitations enregistrées à l'échelle d'une station ont été comparées à celles moyennées à l'échelle régionale. A cet effet, la même démarche d'analyse appliquée aux données de précipitations régionales a également été appliquée aux données de précipitation de la station de Niaouli. Le choix de cette station se justifie par le fait qu'elle est située au centre de la région d'étude et qu'elle ne présente aucune année manquante sur la période 1951-2010 (Tableau 4.1).

Analyse des températures minimales et maximales journalières et des vitesses instantanées maximales journalières de vents

Tout comme les précipitations, les températures minimales et maximales journalières ont été analysées suivant les sous-périodes 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3). Sur chaque sous-période, nous avons constitué des classes de températures minimales et des classes de températures maximales d'amplitude 1°C. Ceci a permis de construire les histogrammes respectifs pour chacune des trois sous-périodes.

Quant aux vitesses instantanées maximales journalières de vents, elles ont été

analysées suivant les décennies au regard de la longueur de la période 1961-2010. Sur chaque décennie, nous avons construit l'histogramme des classes de vitesses instantanées maximales journalières de vents. Ces classes ont été définies sur la base de l'échelle de Beaufort (Tableau 4.2). Cette démarche permet de faire correspondre les vitesses de vents à leurs manifestations physiques, puisque les producteurs font généralement cas des manifestations apparentes des vents que de leurs vitesses brutes.

TABLE 4.2 – Classes des vitesses de vents et leurs manifestations sur l'échelle de Beaufort

Classe	Vitesses (m/s)	Force	Manifestations sur l'échelle de Beaufort
C1	1 à 3	2	Légers, à peine perçu sur le visage
C2	4 à 5	3	Faible, feuilles bougent, fumées inclinées
C3	6 à 8	4	Modéré, le vent soulève la poussière et seules les petites branches bougent
C4	9 à 11	5	Modéré-Fort, les arbustes se balancent
C5	12 à 14	6	Fort, les grosses branches d'arbres bougent, tenir un parapluie devient difficile
C6	15 à 17	7	Très Fort, les arbres sont entièrement agités, la marche à pied demande un effort
C7	18 à 21	8	Rafale, les petites branches cassent
C8	22 à 24	9	Fort coup de vent, toitures fragiles endommagées, certains arbres cassent

Analyse des perceptions paysannes de la variabilité climatique

Deux approches ont été utilisées pour analyser les perceptions paysannes de la variabilité climatique. Premièrement, les données de perception ont été analysées de façon globale sans tenir compte de la position géographique des villages enquêtés par rapport à la station de Niaouli. Cette démarche correspond à une analyse régionale des perceptions. La deuxième approche a consisté en l'analyse

des perceptions en fonction de la position géographique des villages enquêtés par rapport à la station de Niaouli. Cette approche correspond à une analyse plus localisée des perceptions. Elle permet d'analyser le degré de convergence entre les perceptions et les observations climatiques en fonction de la position géographique du référentiel de perception du chef d'exploitation (village) par rapport à la station climatique. Dans cette deuxième approche, nous avons défini trois groupes de villages sur la base de la distance qui les sépare de la station de Niaouli : (i) le premier groupe de villages (groupe 1) comprend tous les villages situés dans un rayon de 10 km autour de la station de Niaouli, (ii) le deuxième groupe de villages (groupe 2) est constitué par tous les villages situés dans un rayon compris entre 11 et 25 km autour de la station de Niaouli et (iii) le troisième groupe de villages (groupe 3) est composé de tous les villages situés dans un rayon compris entre 26 et 40 km autour de la station de Niaouli. Le choix des rayons reste discutable. Ensuite, un test de comparaison de pourcentages de khi-2 (χ^2) a été réalisé pour vérifier au seuil de risque de 5%, les hypothèses suivantes :

- H_0 : la perception des chefs d'exploitation de la variabilité climatique est indépendante du groupe de villages auquel ils appartiennent ;
- H_1 : la perception des chefs d'exploitation de la variabilité climatique est dépendante du groupe de villages auquel ils appartiennent.

Soit $\chi_{th}^2=5.99$, la valeur critique du test pour un seuil de risque de 5% et un degré de liberté égale à 2 (2 modalités de réponse et 3 groupes de villages). H_0 sera acceptée si la valeur de χ_{cal}^2 est inférieure à χ_{th}^2 (5.99), et rejetée dans le cas contraire.

4.3 Résultats et discussion

4.3.1 Modifications du régime pluviométrique

La variabilité interannuelle des pluies sur la zone d'étude (Figure 4.3) est caractérisée par des fluctuations de hautes fréquences, contrairement au Sahel où les fluctuations de basses fréquences dominant (Le Lay et Galle, 2005). La rupture climatique mise en évidence par plusieurs auteurs (Le Barbé et *al.*, 2002) vers la fin des années 1960 au Sahel semble moins nette sur la figure 4.3. En effet, l'alternance de longues périodes humides et sèches sur la région d'étude est largement

perturbée par des fluctuations inter-annuelles. Toutefois, la première moitié des années 1980 a été systématiquement sèche ($IPS < 0$). Cette séquence de six années sèches a également été observée en région soudanienne au Nord-Bénin (Lawin et al. 2011 ; Le Lay et Galle, 2005). A partir des années 1990, un mode de variabilité inter-annuelle, similaire à celui d'avant 1970, semble s'instaurer sur la région d'étude où les séquences d'années sèches successives sont plus souvent intercalées d'années humides. En effet, on observe respectivement 12, 6 et 10 années de changement d'état (une année excédentaire succédant à une année déficitaire ou *vice-versa*) sur les sous-périodes 1951-1970, 1971-1990 et 1991-2010 (Figure 4.3). Ainsi, comme au Sahel (Ozer et al., 2009 ; Ali et Lebel, 2008 ; Balme et al. 2006), ce nouveau mode de variabilité inter-annuelle des pluies plaide pour distinguer la période 1991-2010 de la sécheresse généralisée des décennies 1970 et 1980 sur la région d'étude.

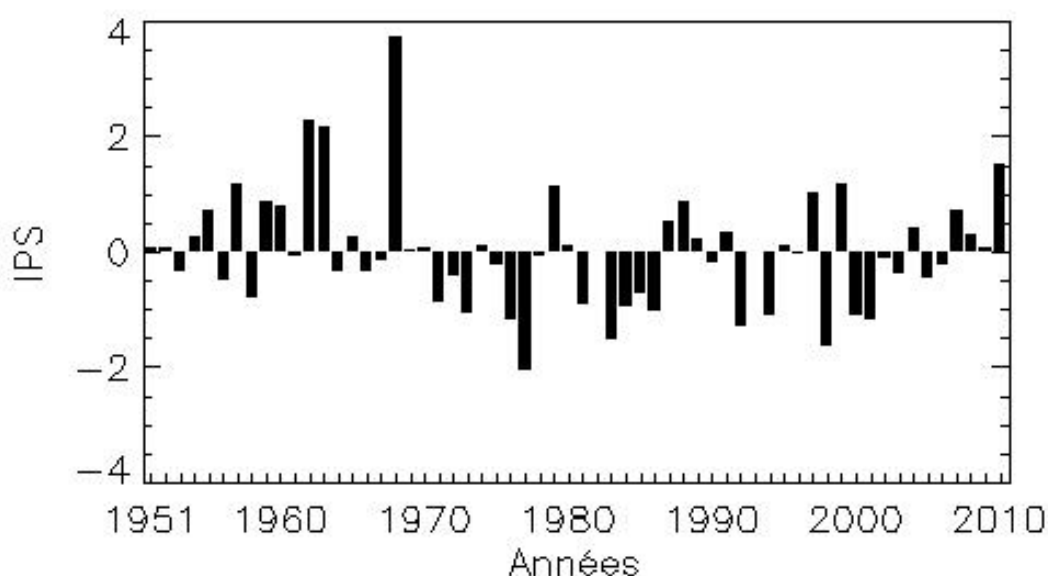


FIGURE 4.3 – Variabilité inter-annuelle des pluies sur le plateau d'Allada entre 1951 et 2010.

La comparaison des indices pluviométriques calculés sur la station de Niaouli (Figure 4.4) avec ceux calculés à l'échelle de la région (Figure 4.3) illustre les différences notables entre variabilités pluviométriques régionale et locale. Une année peut être excédentaire à l'échelle locale et déficitaire à l'échelle régionale

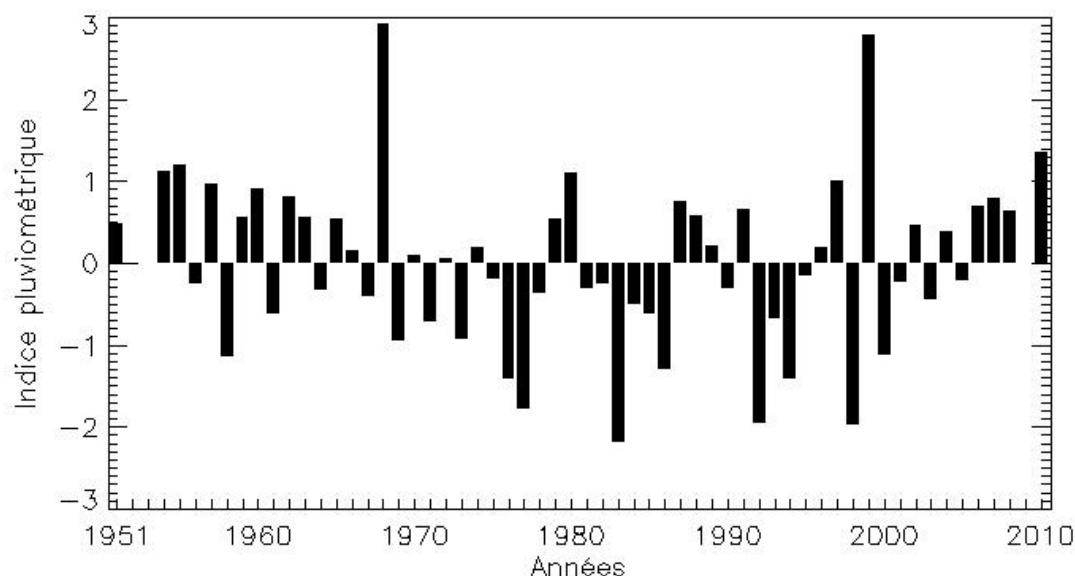


FIGURE 4.4 – Variabilité inter-annuelle des pluies sur la station entre 1951 et 2010.

ou *vice-versa*. Par exemple, l'année 2006 qui a été excédentaire (IPS= 0.72) à la station de Niaouli a été déficitaire (IPS= -0.20) à l'échelle régionale. Il apparaît que la classification entre années excédentaires et années déficitaires doit se faire à partir de considérations locales autant que régionales (Lawin et *al.*, 2011 ; Balme et *al.*, 2006 ; Le Lay et Galle, 2005). Ceci justifie l'intérêt d'analyser la variabilité pluviométrique et sa perception par les producteurs à l'échelle locale autant que régionale.

Le tableau 4.3 résume l'évolution pluri-décennale des variables pluviométriques telles que le cumul saisonnier, le nombre et le cumul moyen des jours pluvieux aux échelles régionale et locale. Quelle que soit l'échelle considérée, toutes ces variables pluviométriques ont été relativement déficitaires entre 1951-1970 et 1971-1990 sur les deux saisons pluvieuses. Les déficits du cumul pluviométrique observés sur la région d'étude (entre -20% et -16%) confirment les résultats de Servat et *al.*, (1999) qui montrent un déficit de -19% sur le Bénin entre des périodes similaires. Entre 1971-1990 et 1991-2010, on observe sur la région d'étude et sur la station de Niaouli une augmentation relative du cumul pluviométrique sur les deux saisons des pluies (entre 6% et 24%). Quant au nombre de jours pluvieux, il a encore été déficitaire sur la grande saison des pluies (entre -3% et -1%) alors qu'il a augmenté sur la petite

saison des pluies (entre 7% et 18%) autant à l'échelle régionale que locale. Dans le même temps, le cumul moyen des jours pluvieux a systématiquement augmenté sur les deux saisons pluvieuses quelle que soit l'échelle considérée (entre 8% et 10%). En comparant la sous-période 1951-1970 à celle de 1991-2010, on remarque que le cumul pluviométrique et le nombre de jours pluvieux demeurent déficitaires sur les deux saisons pluvieuses lorsqu'on considère l'échelle régionale. En revanche, sur la station de Niaouli, c'est uniquement sur la grande saison des pluies que ces deux variables demeurent déficitaires puisqu'elles ont augmenté sur la petite saison des pluies (1% et 7%). Inversement, le cumul moyen des jours pluvieux a dépassé son niveau d'avant 1970 au cours des années 1990 et 2000 sur toutes les échelles et sur toutes les saisons pluvieuses, à l'exception de la petite saison des pluies sur la station de niaouli où il demeure déficitaire.

TABLE 4.3 – Evolution pluri-décennale des variables pluviométriques entre 1951-1970 et 1971-1990 (P1/P2), entre 1971-1990 et 1991-2010 (P2/P3) et entre 1951-1970 et 1991-2010 (P1/P3) sur le plateau d'Allada (Région) et sur la station de Niaouli.

Saison	Echelle	Cumul plu- viométrique			Nombre de jours pluvieux			Cumul moyen des jours plu- vieux		
		P1/P2	P2/P3	P1/P3	P1/P2	P2/P3	P1/P3	P1/P2	P2/P3	P1/P3
GSP	Région	-20%	7%	-15%	-12%	-3%	-15%	-9%	10%	1%
	Niaouli	-16%	6%	-10%	-16%	-1%	-17%	-1%	6%	5%
PSP	Région	-17%	17%	-3%	-14%	7%	-8%	-4%	9%	5%
	Niaouli	-18%	24%	1%	-9%	18%	7%	-11%	8%	-4%

Légende : GSP = grande saison des pluies (mars à juillet), PSP = petite saison des pluies (Septembre à novembre)

Il ressort de l'analyse des séquences sèches sur la région d'étude et sur la station de Niaouli (Tableau 4.4) qu'entre 1951-1970 et 1971-1990, la fréquence des séquences sèches de durées inférieures à 3 jours a diminué alors que celle des séquences sèches de durées supérieures à 3 jours a augmenté pendant la grande

saison des pluies, en l'occurrence les séquences sèches de durées comprises entre 8 et 14 jours. Quant à la petite saison des pluies, elle a enregistré une diminution de la fréquence des séquences sèches de durées inférieures à 14 jours et une augmentation de celle des séquences sèches de durées supérieures à 14 jours. Ces évolutions traduisent une augmentation de la durée moyenne des séquences sèches sur la région d'étude pendant les décennies sèches 1970 et 1980. Ces résultats confirment ceux de Agbossou et *al.*, (2012) qui ont montré une augmentation générale de la probabilité d'occurrence de deux décades sèches consécutives entre 1951-1970 et 1971-1990 sur l'ensemble du Bénin. Cette augmentation de la durée moyenne des séquences sèches s'est poursuivie après 1990 pendant la grande saison des pluies mais elle semble s'être interrompue sur la petite saison des pluies sur la région d'étude et sur la station de Niaouli. En effet, l'augmentation et la diminution des fréquences respectives des séquences sèches de durées supérieures à 3 jours et de durées comprises entre 8 et 14 jours ont continué après 1990 sur la grande saison des pluies. En revanche, la tendance observée sur les décennies sèches 1970 et 1980 s'inverse sur la petite saison des pluies. Ceci témoigne d'une amélioration de la qualité de la petite saison des pluies sur cette station après 1990, contrairement à la grande saison des pluies qui demeure précaire sur la région d'étude et sur la station de Niaouli.

TABLE 4.4 – Evolution pluri-décennale des séquences sèches pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada (Région) et sur la station de Niaouli.

Classe	GSP						PSP					
	Région			Niaouli			Région			Niaouli		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1-3j (%)	39	32	29	39	31	30	36	30	34	33	32	35
4-7j (%)	33	33	34	33	32	35	36	34	30	36	33	31
8-14j (%)	28	35	37	19	40	41	34	32	34	43	26	31
>14j (%)	28	36	36	37	33	30	26	42	32	21	48	31

Légende : GSP = grande saison des pluies (mars à juillet) ; PSP = petite saison des pluies (Septembre à novembre)

Le tableau 4.5 résume l'évolution des dates de début et de fin des saisons des pluies aux échelles régionale et locale. A l'échelle régionale on remarque un démarrage tardif de la grande saison des pluies et une fin précoce de la petite saison des pluies entre 1951-1970 et 1971-1990. En considérant l'échelle locale sur la même période, on observe un démarrage tardif et une fin précoce de la grande saison des pluies et un démarrage précoce de la petite saison des pluies. Entre 1971-1990 et 1991-2010, on remarque à l'échelle régionale que la grande saison des pluies a tendance à débiter précocement et finir tardivement. En revanche, sur la station de Niaouli le démarrage tardif et la fin précoce de la grande saison des pluies persistent. Quant à la petite saison des pluies sur la même période, elle connaît un démarrage précoce et une fin tardive à l'échelle régionale. Par contre, sur la station de Niaouli, la date de démarrage de cette saison n'a pas varié, mais sa fin est désormais plus précoce. En comparaison avec les dates historiques (1951-1970), le démarrage de la grande saison pluvieuse accuse un retard d'environ 25 jours sur la région d'étude et de 30 jours sur la station de Niaouli. Quant à la petite saison des pluies, elle débute avec une avance de 5 jours sur la région d'étude et de 10 jours sur la station de Niaouli. Ces changements des dates de démarrage des saisons pluvieuses impactent profondément l'agriculture, car d'elles dépendent le calendrier agricole et en grande partie les quantités récoltées (Camberlin et Diop, 2003).

4.3.2 Evolution des températures minimales et maximales journalières et des vitesses instantanées maximales journalières des vents

Les figures 4.5 et 4.6 montrent un déplacement progressif des modes des températures minimales et maximales journalières, des faibles valeurs vers les fortes valeurs, entre 1953 et 2010 sur la station synoptique de Cotonou. Ce déplacement des modes des températures minimales et maximales traduit un réchauffement du climat de la région d'étude. Ce réchauffement touche toutes les saisons de l'année. Ce résultat corrobore celui de Gnanglè et *al.*, (2011) qui ont mis en évidence sur l'ensemble de la région soudano-guinéenne du Bénin une variation temporelle linéaire de la température moyenne annuelle, avec un taux de croissance de l'ordre

TABLE 4.5 – Evolution pluri-décennale des dates de début et de fin de la grande saison des pluies (GSP, mars à juillet) et de la petite saison des pluies (PSP, septembre à novembre) pour les trois sous-périodes : 1951-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur le plateau d'Allada et sur la station de Niaouli.

Paramètres	GSP						PSP					
	Région			Niaouli			Région			Niaouli		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Début	16/03	15/04	10/04	11/03	21/03	10/04	07/09	07/09	02/09	07/09	28/08	28/08
Fin	09/07	09/07	14/07	14/07	09/07	04/07	27/10	17/10	27/10	11/11	11/11	06/11
Longueur (jours)	115	85	95	125	110	85	50	40	55	65	75	70

de 0.03°C par an.

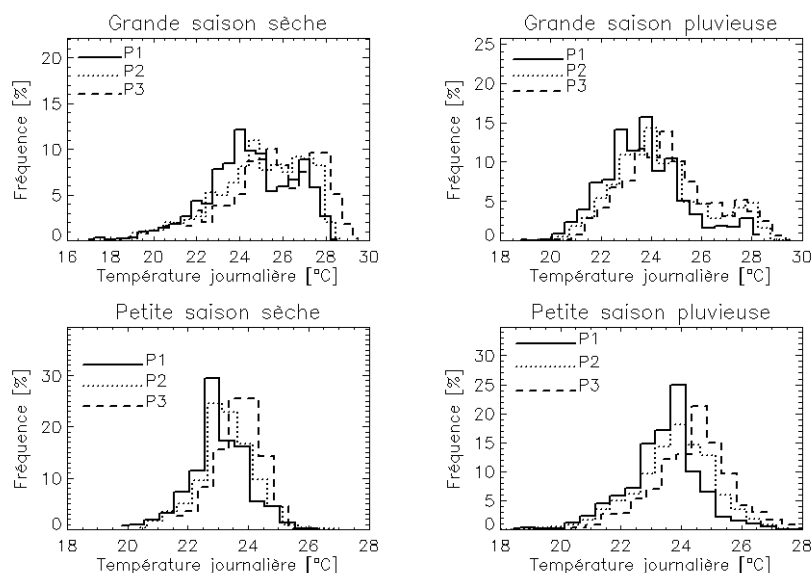


FIGURE 4.5 – Fréquences des températures minimales journalières pour les trois sous-périodes : 1953-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) sur la station synoptique de Cotonou.

L'analyse de la figure 4.7 montre que la fréquence des vents correspondant aux classes « modérés-fort » à « fort coups de vents » a régulièrement baissé depuis 1971

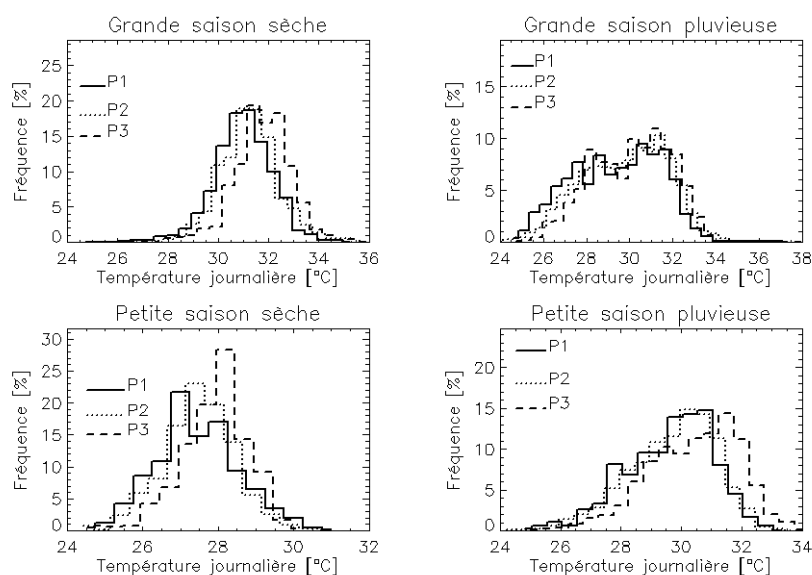


FIGURE 4.6 – Fréquences des températures maximales journalières pour les trois sous-périodes : 1953-1970 (P1), 1971-1990 (P2) et 1991-2010 (P3) à la station synoptique de Cotonou.

au profit de l'augmentation de l'occurrence des vents correspondant aux classes plus faibles, notamment « faible » à « modéré ». Ceci s'observe sur toutes les saisons de l'année et témoigne d'un affaiblissement des vents après 1970 sur la station synoptique de Cotonou.

4.3.3 Caractéristiques des exploitations agricoles enquêtées

Les principales caractéristiques des 201 exploitations enquêtées sont présentées dans le tableau 4.6. Les chefs d'exploitation (CE) interviewés ont une moyenne d'âge de 51 ans avec 27 ans d'expériences en tant que chefs d'exploitation. Ils ont vécu en moyenne 41 ans dans leur village. Ils sont donc en mesure d'appréhender la variabilité climatique dans leur localité. Les exploitations sont exclusivement manuelles. En conséquence, 92% des CE ont recours à la main d'œuvre salariée pour effectuer les travaux champêtres tels que le sarclage, le labour, le semis, le nombre d'actifs agricoles par exploitation étant relativement faible (3 ± 2).

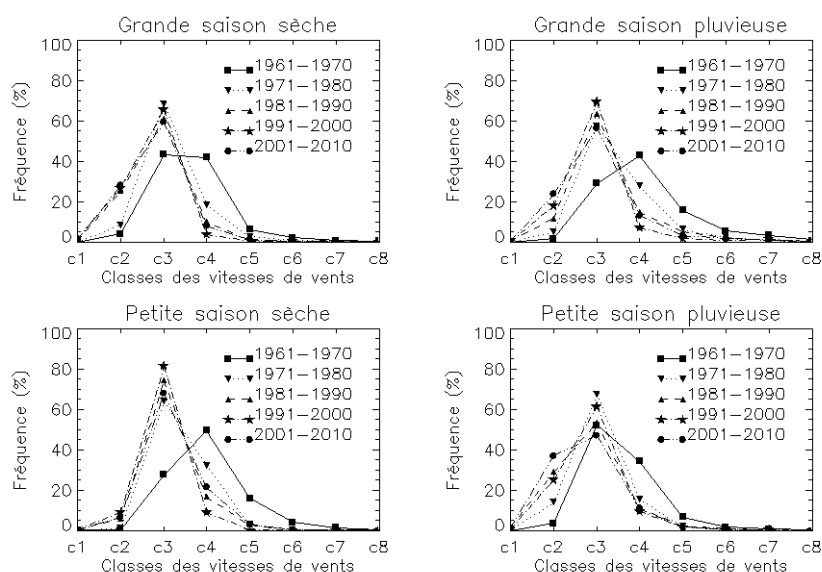


FIGURE 4.7 – Fréquences des 8 classes de vitesses instantanées maximales des vents (« Légers » à « Fort coup de vent ») à la station synoptique de Cotonou entre 1961 et 2010.

4.3.4 Perceptions paysannes de la variabilité pluviométrique

Le tableau 4.7 présente les perceptions de la variabilité pluviométrique des 201 chefs d'exploitation (CE). L'analyse du tableau 4.7 montre que certaines perceptions sont plus tranchées que d'autres. En ce qui concerne la grande saison des pluies, les perceptions les plus tranchées sont relatives à la diminution du cumul pluviométrique et du nombre de jours pluvieux, à l'augmentation du cumul moyen des jours pluvieux et de la fréquence des séquences sèches plus longues et à un démarrage tardif. Quant à la petite saison des pluies, les perceptions les plus tranchées ont trait à la diminution du nombre de jours pluvieux, à l'augmentation de la fréquence des séquences sèches plus longues et à une fin précoce. En ce qui concernent les perceptions mitigées, elles se rapportent à la fin précoce de la grande saison des pluies, à la diminution du cumul pluviométrique, à l'augmentation du cumul moyen des jours pluvieux et au démarrage précoce de la petite saison des pluies. La comparaison des perceptions tranchées avec les tendances pluviométriques observées à l'échelle de la région montre que les perceptions tranchées reflètent davantage les changements des précipitations observés sur la région d'étude entre 1951-1970 et 1971-1990, notamment le démarrage tardif de la grande saison des pluies, la fin précoce de la petite saison des pluies, l'augmenta-

TABLE 4.6 – Caractéristiques des 201 exploitations agricoles enquêtées.

Caractéristiques des exploitations agricoles	Eff. ou %
Pourcentage d'exploitations en culture manuelle (%)	100
Nombre moyen d'outils manuels par exploitation	3±2
Nombre moyen d'actifs agricoles par exploitation	3±2
Surface moyenne cultivée par exploitation (ha)	5±7
Pourcentage de chefs d'exploitation qui ont recours à la main d'œuvre salariée (%)	92
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant l'agriculture comme activité principale (%)	94
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant une activité secondaire (%)	84
Pourcentage de chefs d'exploitation non scolarisés (%)	44
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant un niveau d'enseignement primaire (%)	37
Pourcentage de chefs d'exploitation ayant un niveau d'enseignement secondaire (%)	17
Pourcentage de chefs d'exploitation de sexe masculin (%)	94
Pourcentage de chefs d'exploitation de sexe féminin (%)	6
Age moyen des chefs d'exploitation (années)	51±11
Nombre moyen d'années passées à la tête de l'exploitation	27±10
Nombre moyen d'années passées dans le village par les chefs d'exploitation	41±16

tion de l'occurrence des séquences sèches plus longues et le déficit pluviométrique des deux saisons pluvieuses. Ces perceptions sont similaires à celles relatées par d'autres auteurs en Afrique de l'Ouest (Ouédraogo et *al.*, 2010; Agossou et *al.*, 2012; Kizauzi et *al.*, 2012; Macharia et *al.*, 2012; Moyo et *al.*, 2012, Tambo et Abdoulaye, 2012; Vissoh et *al.*, 2012). Par ailleurs, à l'exception de l'augmentation du cumul moyen des jours pluvieux de la grande saison des pluies, la reprise des

précipitations observée à l'échelle de la région d'étude à partir de 1990 semble ne pas retenir l'attention des producteurs. Ces derniers mettent davantage l'accent sur la dégradation permanente de la qualité des saisons pluvieuses, en l'occurrence le retard de la grande saison des pluies, la fin précoce de la petite saison des pluies et la recrudescence des séquences sèches plus sévères des deux saisons des pluies. Il semble donc que la récente reprise des précipitations sur la région n'est pas considérée par les chefs d'exploitation agricole comme une amélioration significative.

TABLE 4.7 – Perceptions paysannes de la variabilité pluviométrique et mesures d'adaptation des 201 exploitations agricoles.

Saisons	Variables	Aug. ou Prec. (%)	Dim. ou Tard. (%)	Mesures d'adaptation
GSP	DEB	27	73	Modification des dates de semis : les paysans font varier les dates de semis en fonction des pluies ; en général, elles sont retardées de 2 à 3 semaines par rapport à la date historique (mi-mars). Adoption de variétés améliorées de maïs à cycle plus court (90 jours) que les variétés traditionnelles (120 jours). Utilisation des bas-fonds. Rituels aux divinités, « hêviosso » : dieu du ciel, « sakpata » : dieu de la terre, et « Dan » : serpent reliant le ciel et la terre. La fabrication de charbon de bois. L'utilisation des engrais chimiques.
	FIN	54	46	
	N	29	71	
	FSS	71	29	
	H	63	37	
	P	36	64	
PSP	DEB	57	43	
	FIN	67	33	
	N	33	67	
	FSS	68	32	
	H	56	44	
	P	47	53	

Légende : GSP = grande saison des pluies (mars à juillet) ; PSP = petite saison des pluies (septembre à novembre) ; Aug = augmentation ; Prec = précocité ; Dim = diminution ; Tard = tardiveté ; P = cumul pluviométrique ; H = cumul moyen des jours pluvieux ; FSS = fréquence des séquences sèches ; DEB = début saison pluvieuse ; FIN = fin saison pluvieuse.

A l'échelle locale, la comparaison des perceptions des CE des trois groupes de villages fait apparaître des divergences significatives d'après les résultats du test de Khi-2 ($\chi^2_{cal} > \chi^2_{th}$), montrant ainsi que la perception de la variabilité pluviométrique est liée au groupe de villages auquel appartient le chef d'exploitation (Tableau 4.8). Les perceptions des CE des trois groupes de villages convergent ($\chi^2_{cal} < \chi^2_{th}$) vers l'idée d'un début tardif des pluies, un déficit pluviométrique et une recrudescence des séquences sèches plus longues pendant la grande saison des pluies. Quant à la petite saison des pluies, les perceptions des CE des trois groupes de villages convergent vers l'idée d'un début précoce des pluies, même si ces perceptions sont globalement mitigées. En revanche, les perceptions des CE des trois groupes de villages divergent de façon significative ($\chi^2_{cal} > \chi^2_{th}$) sur les modifications de la date d'arrêt des pluies, du nombre et du cumul moyen des jours pluvieux pendant la grande saison des pluies. Ces perceptions divergent significativement aussi sur les tendances de la date d'arrêt des pluies, de la fréquence des séquences sèches plus longues, du cumul pluviométrique, du nombre et du cumul moyen des jours pluvieux pendant la petite saison des pluies. Ces divergences peuvent s'expliquer par la forte variabilité spatiale des pluies qui caractérise la région soudano-guinéenne (Le Lay et Galle, 2005). Lorsqu'il y a divergence entre les perceptions des CE des différents groupes de villages, c'est généralement les perceptions des CE situés à proximité de la station de Niaouli (groupe 1) qui concordent avec les tendances pluviométriques mises en évidence sur cette station. Ceci montre que la proximité avec la station pluviométrique est un facteur clé à considérer pour une convergence entre les perceptions et les observations pluviométriques. En effet, les CE du groupe 1 perçoivent la fin précoce de la grande saison des pluies, l'augmentation du cumul pluviométrique, du nombre et du cumul moyen des jours pluvieux, la diminution de l'occurrence des séquences sèches et l'arrêt précoce des pluies pendant la petite saison des pluies. Ces perceptions sont en phase avec les tendances mises en évidence sur la station de Niaouli entre 1971-1990 et 1991-2010. En revanche, les CE dont les villages sont éloignés de la station de Niaouli (Groupe 2 et Groupe 3) ont des avis contraires.

TABLE 4.8 – Perceptions paysannes de la variabilité pluviométrique des trois groupes de villages autour de la station de Niaouli.

Saison	Variables	Aug. ou Prec. (%)			Dim. ou Tard (%)			χ^2_{cal}
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	
GSP	DEB	28	22	28	72	78	72	2.73
	FIN	66	62	33	34	38	67	6.64*
	N	53	24	29	47	76	71	8.98*
	FSS	70	71	73	30	29	27	0.09
	H	72	52	74	28	48	26	8.63*
	P	43	27	42	57	73	58	4.66
PSP	DEB	46	63	56	54	37	44	0.86
	FIN	54	73	56	46	27	44	14.23*
	N	50	34	20	50	66	80	7.31*
	FSS	48	75	74	52	25	26	7.04*
	H	77	55	39	23	45	61	9.97*
	P	76	41	33	24	59	67	13.19*

Légende : GSP = grande saison des pluies (mars à juillet) ; PSP = petite saison des pluies (septembre à novembre) ; Aug = augmentation ; Prec = précocité ; Dim = diminution ; Tard = tardiveté ; P = cumul pluviométrique ; H = cumul moyen des jours pluvieux ; FSS = fréquence des séquences sèches ; DEB = début saison pluvieuse ; FIN = fin saison pluvieuse ;
 $^* = \chi^2_{cal} > \chi^2_{th}$.

4.3.5 Perceptions paysannes des modifications des températures et des forces des vents

Le tableau 4.9 résume les perceptions des modifications de température et des forces de vents des 201 CE. Ces derniers perçoivent l'augmentation des températures pendant les saisons sèches et leur diminution pendant les saisons pluvieuses. La perception de la diminution des températures pendant les deux saisons pluvieuses est contraire à l'augmentation permanente des températures extrêmes journalières observées sur ces saisons à la station synoptique de Cotonou. Cet écart de per-

ception peut s'expliquer par le déficit en rayonnement qui distingue les saisons pluvieuses des saisons sèches, du fait d'une forte couverture nuageuse.

TABLE 4.9 – Perceptions paysannes des changements des températures et des forces des vents et mesures d'adaptation des 201 exploitations agricoles.

Variable	Saisons	Aug. (%)	Dim. (%)	Adaptations
Temp.	PSS	68	32	Agrandissement des fenêtres des maisons, dormir à la belle étoile Augmentation du nombre de bains journaliers. Modification des heures de travail : les paysans ne travaillent plus entre 12H et 15H comme autrefois.
	GSS	93	7	
	GSP	40	60	
	PSP	37	63	
Vents	GSS	38	62	Reboisement autour des maisons et des champs.
	PSS	53	47	
	GSP	71	29	
	PSP	55	45	

Légende : GSP = grande saison des pluies (mars à juillet), PSP = petite saison des pluies (septembre à novembre), PSS= petite saison sèche (août) et GSS=grande saison sèche (décembre à février)); Aug = augmentation ; Dim = diminution ; Temp. = température

En ce qui concerne les forces des vents (Tableau 4.9), les CE estiment que les vents sont plus forts pendant la grande saison des pluies et plus faibles pendant la grande saison sèche. Quant aux petite saison sèche et petite saison pluvieuse, les perceptions sont mitigées. Toutefois, l'augmentation des vents est davantage citée que leur diminution sur ces saisons. Cette perception des producteurs de la hausse des vents est aussi relatée par plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest (Ouédraogo *et al.*, 2010 ; Agossou *et al.*, 2012 ; Vissoh *et al.*, 2012 ; Ozer *et al.*, 2013) alors que les mesures de vitesses de vents indiquent le contraire. Dans le cas de la région d'étude, cette divergence entre les perceptions et les observations des forces des vents peut s'expliquer par une dégradation profonde du couvert végétal. En effet, la région d'étude connaît un fort taux de déboisement dû à la pression foncière

et à la surexploitation des ressources naturelles (fabrication de charbon de bois). Le déboisement a causé la disparition des forêts qui jouaient le rôle de brise-vent. Ces écarts entre les perceptions des températures et des vents et les observations climatiques peuvent influencer l'orientation des stratégies agricoles. En effet, plusieurs auteurs (O'Brien et *al.*, 2010; Ouédraogo et *al.*, 2010) mettent en exergue une relation de dépendance entre les stratégies d'adaptation et les perceptions des changements climatiques. Toutefois, pour les températures et le vent, il convient d'être prudent sur la confrontation entre perceptions et observations, dans la mesure où ces dernières ne sont disponibles qu'à la station synoptique de Cotonou, située à 30 km de la région d'étude, avec de possibles effets locaux.

4.3.6 Mesures d'adaptation adoptées par les chefs d'exploitation face à la variabilité climatique

Face aux aléas climatiques, les producteurs ont su développer au fil du temps, une remarquable capacité d'adaptation (Kpadonou et *al.*, 2012). Les principales mesures d'adaptation sont résumées dans les tableaux 4.7 et 4.9. Le nombre et la diversité des mesures d'adaptation mises en place par les producteurs indiquent une réelle volonté de minimiser les impacts de la variabilité climatique. Cependant, si certaines sont bien adaptées aux changements décrits, notamment l'adoption de variétés à cycle court, la modification des dates de semis, la mise en valeur des bas-fonds, le changement des heures de travail et le reboisement, d'autres en revanche sont susceptibles d'engendrer des pressions supplémentaires sur les ressources naturelles en aggravant les impacts des changements climatiques, en l'occurrence l'occupation anarchique des bas-fonds, la fabrication de charbon de bois, la forte utilisation des engrais chimiques. En effet, la source d'énergie la plus utilisée (pour d'autres activités que l'éclairage, comme la cuisine) est le bois de feu et le charbon de bois. Ceci implique un fort taux de déboisement des forêts alors que le couvert végétal a un rôle déterminant sur le climat comme l'ont souligné Zheng et Eltahir (1999) et Charney et *al.* (1977). En outre, dans certaines zones de bas-fonds, à l'instar de la région centrale du Bénin (Abidji et *al.*, 2012) où le maïs ne peut être cultivé en raison des inondations liées en partie à une variabilité accrue des pluies et à la dégradation de l'état de surface due au déboisement, la riziculture se développe.

Ainsi, le développement des cultures de riz devient une stratégie d'adaptation agricole pertinente. La riziculture justifie donc l'exploitation des bas-fonds habituellement inexploités, permettant de répondre à la forte pression démographique et à la nécessité d'accroître la production alimentaire. En dépit de ses avantages, l'occupation des bas-fonds sans un aménagement préalable adéquat de ceux-ci engendre une extension des zones inondables vers des zones non inondables. L'utilisation abusive des engrais chimiques pour accroître la production alimentaire augmente les risques de pollution des cours d'eau régulièrement utilisés comme sources d'alimentation par les populations.

4.4 Conclusion de chapitre

L'approche utilisée dans cette étude a permis de mettre en évidence des convergences et divergences entre les perceptions paysannes et les observations climatiques. Il ressort de cette étude que les producteurs sont davantage marqués par la dégradation de la qualité des saisons des pluies observée entre 1951-1970 et 1971-1990, en l'occurrence la modification des dates de début et de fin des saisons des pluies, la recrudescence des séquences sèches, la diminution du nombre de jours pluvieux et le déficit pluviométrique, que par la relative récente reprise des précipitations au cours des années 1990 et 2000 sur la région d'étude. Toutefois, le changement d'échelle, de régionale à locale, réduit sensiblement l'écart entre les perceptions paysannes et les observations climatiques, en ce sens que les perceptions des CE situés à proximité de la station de Niaouli concordent davantage avec les modifications récentes (entre 1971-1990 et 1991-2010) observées à cette station que celles des CE situés plus loin. Il semble que du fait de la forte variabilité spatiale des pluies en région guinéenne (Le Lay et Galle, 2005), les perceptions paysannes s'écartent des observations pluviométriques au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la station pluviométrique de référence.

Il ressort également de cette étude que les CE perçoivent la hausse des températures pendant les saisons sèches et leur baisse pendant les saisons pluvieuses. Quant à la fréquence des vents violents, les CE estiment qu'elle augmente sur toutes les saisons à l'exception de la grande saison sèche. Or, les résultats d'analyses climatiques montrent que la hausse des températures journalières et la diminution

de la fréquence des vents violents ont affecté toutes les saisons. Il convient de rappeler que la hausse des vents violents est régulièrement citée par les populations rurales en Afrique de l'Ouest (Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Agossou et *al.*, 2012 ; Vissoh et *al.*, 2012). Plusieurs hypothèses sont avancées dans la littérature pour expliquer ces divergences, notamment la forte couverture nuageuse pendant les saisons pluvieuses qui fait baisser le rayonnement, le fort taux de déboisement, la forte croissance démographique (Ozer et *al.*, 2013). Ces hypothèses méritent de plus amples investigations pour mieux appréhender les causes des divergences observées.

L'analyse des mesures d'adaptation adoptées par les CE montre qu'elles sont globalement pertinentes au regard de leur perception. Ceci ouvre des perspectives pour l'élaboration de stratégies d'adaptation qui peuvent fortement intéresser les producteurs. Par ailleurs, il urge de proposer des alternatives à la fabrication du charbon de bois et de promouvoir le reboisement sur la région d'étude pour réduire les pressions sur les ressources naturelles qui aggravent les impacts de la variabilité climatique.

Variabilité climatique et maïsiculture pluviale aux échelles interannuelle et intrasaisonnière au sud du Bénin

Ce chapitre a partiellement été publié tel qu'il suit :

Allé CSUY, Baron C, Guibert H, Agbossou KE, Afouda AA, 2014. Choix et risques de stratégies de gestion du calendrier agricole : application à la culture du maïs au Sud-Bénin. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 7(3) : 1137-1147.

Variabilité climatique et maïsiculture pluviale aux échelles interannuelle et intrasaisonnière au sud du Bénin

Résumé

La présente étude caractérise la variabilité interannuelle des rendements agricoles potentiels et met en lumière les différents niveaux de risque liés à la gestion du calendrier agricole au Sud-Bénin. A cet effet, une série de simulations des rendements potentiels de maïs de 90 jours (DMR-ESR-W) a été réalisée avec le modèle SARRA-H en décalant d'une décade, de février à novembre, la recherche automatique de la date de semis entre 1971 et 2010. Cela a permis *a posteriori* de déterminer le rendement potentiel maximal atteint chaque année entre 1971 et 2010 sur chacune des deux saisons des pluies et d'analyser des fenêtres de semis et de récolte. Les évolutions interannuelles 1971-2010 des rendements potentiels maximaux des deux saisons des pluies sont contrastées : les rendements de la grande saison des pluies sont en diminution, alors que ceux de la petite saison des pluies sont en progression depuis 1971. Ce fait s'explique par la différence de distribution séquentielle des pluies entre les deux saisons pluvieuses. En intégrant les contraintes biotiques dans le choix de la période de semis, il apparaît que la période de moindre risque pour semer est la première moitié de mai relativement à la grande saison des pluies et la première moitié de septembre relativement à la petite saison des pluies. Ces résultats peuvent être utiles pour les agriculteurs dans l'orientation de leurs stratégies agricoles.

Mots-Clefs : SARRA-H, rendements potentiels ; variabilité climatique, séquence sèche, maïs, date de semis, plateau d'Allada

5.1 Introduction

Le climat a une influence très forte sur la production agricole (Hansen, 2002), en particulier en Afrique subsaharienne où l'agriculture pluviale occupe près de 93% des terres cultivées (Sultan et *al.*, 2012). De fait, l'évolution climatique

récente de cette région de l'Afrique, marquée par les sécheresses des années 1970 et 1980 (L'hote et *al.*, 2002), a provoqué des vagues de famines (perte des récoltes, décimation du cheptel, migrations des populations) et fragilisé davantage l'économie des pays subsahariens. Les nombreux travaux faisant état de lien en le climat et la production agricole (Butt et *al.*, 2005 ; Adejuwon, 2006 ; Barrios et *al.*, 2008 ; Paeth et *al.*, 2008 ; Nelson et *al.*, 2009 ; Müller et *al.*, 2010 ; Berg, 2011) ont porté généralement sur un pays ou un groupe de pays en particulier et se focalisent sur l'échelle annuelle. Or, dans les régions situées en bordure du Golfe de Guinée telle que le Sud-Bénin où deux saisons des pluies se succèdent dans l'année, les tendances pluviométriques peuvent fortement différer d'une saison à l'autre (Allé et *al.*, 2013). Eu égard au lien entre le climat et l'agriculture pluviale, on peut donc s'interroger sur la variabilité interannuelle des rendements agricoles relatifs à chacune de ces deux saisons pluvieuses.

Par ailleurs, pour lutter contre les aléas climatiques, qui sont loin d'être des phénomènes nouveaux en Afrique, les populations rurales ont adopté diverses mesures d'adaptation (West et *al.*, 2008 ; Mertz et *al.*, 2009 ; Ouedraogo et *al.*, 2010 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Allé et *al.*, 2013b). Cependant, si ces stratégies sont efficaces pour assurer leur survie, elles limitent fortement le développement en entretenant un potentiel de production faible, même quand les conditions pluviométriques sont bonnes, ce qui maintient ces populations rurales dans la pauvreté (CGIAR, 2009). Le recours à l'information climatique peut contribuer efficacement à réduire les conséquences des aléas climatiques. C'est un avis unanimement partagé par les agriculteurs subsahariens qui estiment que les facteurs climatiques contribuent entre 30 et 50% au déclin de leur production agricole pluviale (Mertz et *al.*, 2010). De fait, ils montrent un réel intérêt pour l'information climatique, en premier lieu les dates de démarrage et de fin des saisons des pluies, comme aide à la prise de décision (Ingram et *al.*, 2002 ; Klopper et *al.*, 2006). Cet intérêt peut s'expliquer par le fait que si les agriculteurs connaissaient à l'avance ces dates, ils pourraient augmenter leurs rendements en calant mieux le cycle cultural à la saison des pluies et de fait réduire les pertes de semences et de temps de travail liées aux semis ratés. En Afrique de l'Ouest, depuis la fin des années 1990, un système de prévision opérationnel fournit chaque année des prévisions, des

mois à l'avance, sur la qualité de la saison des pluies à venir (le système PRESAO, Prévision saisonnière en Afrique de l'Ouest (Hamatan et *al.*, 2004 ; Ward et *al.*, 2004). Toutefois, ces prévisions restent encore très incertaines, voire erronées au regard de leur faible performance à reproduire correctement la réalité (Hamatan et *al.*, 2004). En outre, elles ne renseignent que sur le cumul pluviométrique saisonnier. Or, la connaissance du cumul pluviométrique saisonnier à venir n'est pas l'information primordiale qui intéresse les agriculteurs pour l'orientation de leurs stratégies agricoles (Ingram et *al.*, 2002). S'il apparaît donc difficile de répondre correctement aux besoins des agriculteurs en utilisant les prévisions saisonnières, on peut cependant se baser sur les chroniques historiques de précipitations pour fournir l'information climatique nécessaire aux agriculteurs pour gérer le calendrier agricole.

La présente étude a donc un double objectif. Le premier est de combler le manque de données sur l'évolution interannuelle des rendements agricoles, notamment ceux du maïs, en fonction de la variabilité interannuelle des descripteurs intrasaisonniers des saisons des pluies (grande et petite) au Sud-Bénin. Dans une perspective orientée vers l'adaptation aux changements climatiques, le deuxième objectif de l'étude est d'analyser *a posteriori* différents choix de gestion du calendrier agricole pour la culture du maïs et les niveaux de risques agroclimatiques associés dans un contexte climatique guinéen, en l'occurrence le Sud-Bénin.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Zone d'étude

La zone d'étude est le plateau d'Allada (Figure 5.1). Il est situé au sud du Bénin entre les longitudes 1.5°E et 2.3°E et les latitudes 6.2°N et 7°N. Le régime pluviométrique de la région est directement associé au déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) sur le continent africain entre deux positions de quasi-équilibre à 5°N et 10°N (Sultan et Janicot, 2003). On distingue dès lors deux saisons des pluies dans la région d'étude. La première saison des pluies s'étend entre mars et juillet et présente un pic de pluie (9 mm/j) centré sur mi-juin. Le saut de mousson (Sultan et Janicot, 2003) entraîne une récession pluviométrique sur la région d'étude centrée sur le mois d'août. La seconde saison des pluies, liée au re-

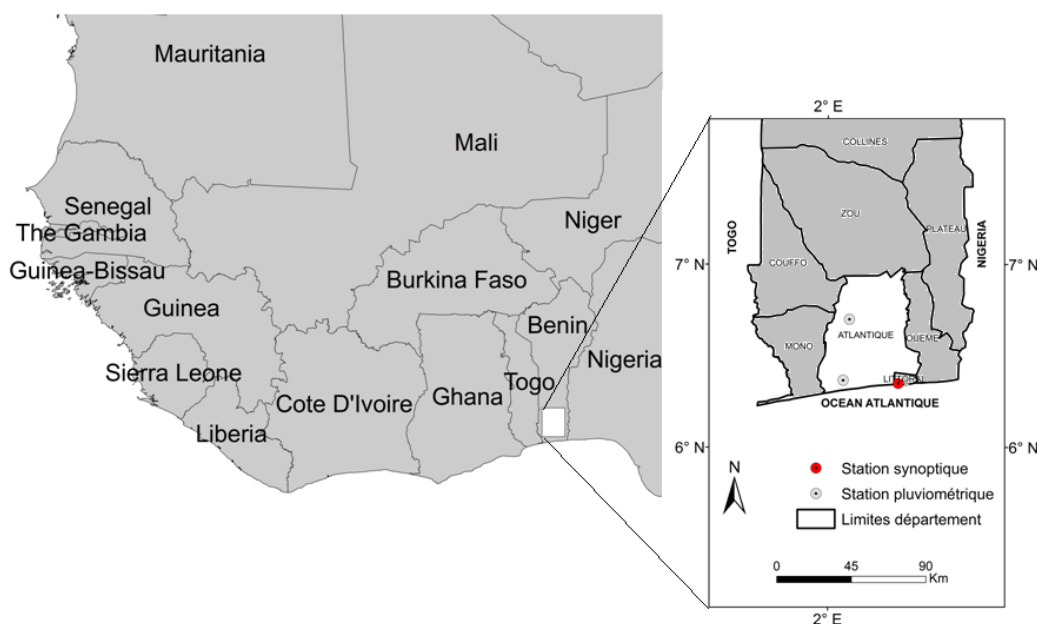


FIGURE 5.1 – Localisation du plateau d'Allada dans le Sud-Bénin et des stations étudiées.

tour de la ZCIT vers les latitudes méridionales, s'étend entre septembre et novembre et culmine en début octobre à 5 mm/j. La pluviométrie moyenne interannuelle sur la région d'étude est de 1100 mm entre 1951 et 2010. L'agriculture pluviale est l'activité économique dominante dans la zone d'étude. Les exploitations agricoles sont morcelées en petites parcelles en raison des héritages successifs.

5.2.2 Données utilisées

Données agricoles

Les données agricoles correspondent aux rendements de maïs pour la période 1971-2010. Il ne s'agit pas de rendements observés mais de rendements simulés à partir du modèle agroclimatique SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques Version H). En effet, l'étude de la sensibilité de l'agriculture pluviale à la variabilité climatique nécessite des outils de modélisation pour simuler la réponse des cultures vivrières aux variations climatiques (Sultan et *al.*, 2012). Dans le cadre de cette étude, le choix du modèle SARRA-H pour simuler les rendements potentiels agricoles se justifie par le fait que le centre régional AGRHYMET fournit sur la base de ce modèle, un suivi hydrique des cultures, des

prévisions de rendements agricoles et a développé un système d'alerte précoce pour prévenir les crises alimentaires. En outre, depuis quelques années, les experts agroclimatologues de dix-sept pays ouest africains, dont le Bénin, sont formés par le centre AGRHYMET sur l'utilisation du modèle SARRA-H pour la planification agricole. Dans une perspective de comparaison de nos résultats avec ceux publiés sur l'Afrique de l'Ouest, il nous a paru nécessaire d'utiliser le même modèle de croissance que celui généralement utilisé dans la littérature pour étudier les risques agroclimatiques en Afrique de l'Ouest (Baron *et al.*, 2005 ; Sultan *et al.*, 2005 ; Kouressy *et al.*, 2008 ; Traoré *et al.*, 2011 ; Marteau *et al.*, 2011).

Données climatiques

Elles sont constituées des données journalières de précipitations, d'insolation, de température, d'humidité et de vitesses moyennes de vents pour la période 1971-2010. Elles nous ont été fournies par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les données de précipitations proviennent des stations pluviométriques de Niaouli et de Ouidah installées dans la région d'étude et les autres données climatiques proviennent de la station synoptique de Cotonou située à proximité (à environ 30 km) de la zone d'étude (Tableau 5.1).

TABLE 5.1 – Caractéristiques des stations et données utilisées

Stations	Longitude	Latitude	Données fournies par la station
Niaouli	2.11°E	6.70°N	Pluies journalières
Ouidah	2.00°E	6.36°N	Pluies journalières
Cotonou	2.38°E	6.35°N	Humidité, température, insolation, vitesses moyennes du vent

Les données journalières de précipitations font l'objet d'une double utilisation : d'une part elles servent à calculer les différents descripteurs pluviométriques, d'autre part à forcer le modèle SARRA-H. Quatre descripteurs intrasaisonniers, potentiellement importants pour les rendements agricoles ont été retenus pour ce

travail. Il s'agit pour chaque saison des pluies, du cumul pluviométrique (P), du cumul moyen des jours pluvieux (H), du nombre de jours pluvieux (N) et de la durée moyenne des séquences sèches (SS).

Les autres données climatiques (température, humidité, insolation et vitesse moyenne de vent) sont utilisées par le modèle SARRAH pour calculer la demande hydrique et l'accumulation de chaleur nécessaire au développement de la plante.

5.2.3 Présentation du modèle SARRA-H

Le modèle agro-climatique SARRA-H, développé par le Cirad (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement), est un simulateur de la croissance et du rendement des cultures. Il est particulièrement adapté pour l'analyse de l'impact du climat sur la croissance et le rendement des céréales en milieu tropical (Baron *et al.*, 2005 ; Sultan *et al.*, 2005). SARRA-H est un modèle déterministe et relativement simple qui fonctionne au pas de temps journalier ; il est accessible sur le site <http://sarra-h.teledetection.fr> qui est dédié à ce modèle. Trois types de processus sont pris en compte dans SARRA-H : (i) la croissance de la plante au sein d'une culture, (ii) la phénologie de la plante et (iii) le bilan d'eau intégrant les demandes du sol, de la plante et de l'atmosphère. Ces processus sont largement présentés dans la littérature (Dingkuhn *et al.*, 2003 ; Baron *et al.*, 2005 ; Sultan *et al.*, 2005 ; Kouressy *et al.*, 2008 ; Traoré *et al.*, 2011 ; Marteau *et al.*, 2011).

Phénologie et photopériodisme

Le modèle SARRA-H subdivise le cycle végétatif des graminées en six phases : (i) la levée, (ii) la phase juvénile, (iii) la phase sensible à la photopériode, (iv) la phase reproductive, (v) la phase de remplissage des grains et (vi) la phase de dessiccation des grains. La durée de chaque phase phénologique est simulée dans le modèle SARRA-H à partir d'une constante photothermique sur la base de degré jour cumulé (Marteau *et al.*, 2011). Chaque phase doit atteindre un cumul de degrés jour pour passer au stade suivant, sauf la phase photosensible (PSP) dont la durée est variable en fonction de la sensibilité de la variété à la photopériode (Alagarswamy *et al.*, 1998).

Bilan carboné

Le bilan carboné repose sur une simulation explicite de l'interception du rayonnement (ϵ_a) et du taux de conversion maximum de l'énergie en matière sèche (ϵ_b). Ce coefficient génétique de conversion est modulé par un frein hydrique lié à la transpiration relative (transpiration potentielle/transpiration réelle). Sa valeur moyenne varie entre 3 et 4 g.MJ⁻¹.j⁻¹ pour les plantes en C4 (Kiniry et *al.*, 1989). Une fraction de la production de sucre (amidon) est allouée à la respiration de maintenance en fonction de la biomasse présente et de la température. Cette part est estimée par Penning de Vries et *al.* (1989) à 25° à 0.03 gramme de CO₂ par gramme de matière sèche.

Le reste de la production de sucre (amidon) est attribué à l'augmentation de la biomasse totale qui est alors répartie vers les racines, les tiges et les feuilles. Pour la répartition des biomasses, des relations allométriques empiriques sont utilisées. Ces relations ne sont pas affectées pas le stress hydrique et ne dépendent que du stade de développement de la plante (Anonyme, 2002). Dans le cas des céréales, elles ne sont appliquées que lors de la phase végétative et reproductive ; lors de l'apparition des grains et de la phase de maturation, il n'y a plus de croissance foliaire et racinaire.

L'estimation du rendement est simulée en deux étapes permettant de définir la taille du puits (nombre de grains), puis le remplissage des grains. Durant la phase de remplissage, la demande est fonction de la taille du puits et de l'offre, la quantité de sucre produite est fonction de l'interception du rayonnement sous contrainte hydrique. Si la demande est supérieure à l'offre, ce manque est partiellement satisfait par réallocation des assimilats au niveau des tiges et des feuilles, ce qui entraîne la sénescence des feuilles et se traduit par une diminution de la biomasse verte et ainsi du LAI. En effet, le modèle SARRA-H simule la dynamique de la surface foliaire à travers l'indice de surface foliaire (LAI) calculé suivant l'équation 5.2.1.

$$LAI = SLA \times Biomasse\ feuille \quad (5.2.1)$$

La surface massique des feuilles (SLA) est le rapport entre la surface et le poids sec des feuilles. Elle varie avec le stade de développement, l'âge et l'épaisseur des feuilles (Dingkuhn et *al.*, 1999). La SLA des feuilles est un caractère variétal.

Bilan hydrique

SARRA-H simule le bilan hydrique sur la base d'un système de réservoirs, où seuls les flux verticaux et descendants sont pris en compte. Ce système est constitué de deux réservoirs : un réservoir de surface de taille fixe (20 cm de profondeur) et un second réservoir de taille variable en fonction du front d'humectation. Le réservoir de surface est soumis aux processus d'évaporation alors que le second réservoir n'est soumis qu'aux processus de transpiration. Les processus de transpiration et d'évaporation dépendent (i) de la demande climatique (ET_0) (Allen et *al.*, 1998), (ii) de la couverture foliaire du sol (LAI) et (iii) des phases phénologiques de la plante. L'évaporation et la transpiration sont respectivement limitées par l'eau disponible dans le réservoir de surface (Fraction Evaporable Soil Water (FESW)) et celle disponible pour les racines (Fraction Transpirable Soil Water (FTSW)) comme le montrent les équations 5.2.2 et 5.2.6. Le rapport entre la consommation réelle et la demande potentielle de la plante permet de définir un indice de satisfaction des besoins en eau qui intervient comme frein hydrique au processus d'élaboration des biomasses.

$$Ev_j = EvapPot \times FESW \quad (5.2.2)$$

où,

$$EvapPot = K_{mulch} \times ET_0 \times LTR \quad (5.2.3)$$

$$FESW = H(StockCR - 0.5StockpF4.2) \quad (5.2.4)$$

$$LTR = \exp(-k \times LAI) \quad (5.2.5)$$

Avec :

Ev_j = évaporation du jour j ; $EvapPot$ = évaporation potentielle; LTR = fraction de radiation non interceptée par le couvert où k désigne le coefficient d'extinction de la lumière qui est fonction des propriétés géométriques du couvert; LAI = indice de surface foliaire; $pF\ 4.2$ = point de flétrissement permanent; H = épaisseur du réservoir de surface; $EvapPot$ = évaporation potentielle ($mm\ j^{-1}$) et $FESW$ = fraction d'eau évaporable dans le sol (en %), calculée à partir du taux d'humidité du sol (en %) à la capacité de rétention et 1/2 du taux d'humidité du sol au $pF4.2$ (Allen et *al.*, 1998).

$$Tr_j = [K_{c_{max}}(1 - LTR)] \times CSTR \times ET_0 \quad (5.2.6)$$

où,

$$CSTR = \frac{FTSW}{1 - pfactor} \quad (5.2.7)$$

$$Kc_{max} = \frac{ETR_{max}}{ET_0} \quad (5.2.8)$$

$$pfactor = parP + 0.04(5 - ETM) \quad (5.2.9)$$

$$FTSW = \frac{Stock - pF4.2}{RU \times profrac} \times profrac \quad (5.2.10)$$

Avec :

Tr_j = transpiration du jour j ; Kc_{max} = coefficient cultural maximal de la plante ; LTR = fraction de radiation non interceptée par le couvert ; ET_0 = évapotranspiration potentielle ; $CSTR$ = indice de contrainte hydrique du sol (Allen et *al.*, 1998) ; $ETR_{max} = ETM \times Kc_{max}$; $parP$ = paramètre spécifique à l'espèce, qui exprime le seuil critique d'humidité du sol à partir duquel le stress hydrique réduit linéairement la transpiration (Doorenbos et Kassam, 1979) ; $Stock$ = stock d'eau du sol dans la zone racinaire (mm) ; RU = réserve utile (mm/m) ; $profrac$ = profondeur racinaire ; $pfactor$ = Coefficient pour le calcul du taux de transpiration.

Définition de la date de semis

Lorsqu'aucune date de semis n'est fixée par l'utilisateur (comme c'est le cas dans la présente étude), celle-ci est déterminée automatiquement par le modèle en fonction d'un seuil d'eau disponible dans le sol à la fin de la journée, assurant ainsi une disponibilité en eau suffisante pour l'émergence de la plante ; le seuil de 10 mm a été retenu dans le cas du maïs. Le modèle considère le semis réussi dans le cas où sur les vingt jours suivants le semis, dix sont caractérisés par une croissance de la biomasse. Dans le cas contraire, le modèle suppose le semis non réussi et recherche une autre date permettant de ressemer.

5.2.4 Calibration et vérification du modèle SARRA-H

La calibration du modèle SARRA-H a été effectuée sur sa version 3.2. Lors de la calibration, plusieurs paramètres, généralement traduits en coefficients pour prendre en compte les différents aspects du développement de la plante, ont été intégrés dans le modèle SARRA-H (Tableaux 5.2, 5.3, 5.4, 5.5). Ces paramètres ont soit été calculés sur la base des données expérimentales collectées sur des expérimentations agricoles réalisées en conditions d'approvisionnement en eau et

de fertilité du sol non limitantes, soit ajustés dans les limites des intervalles de variation définis pour les céréales telle que le maïs dans la littérature (Monteith et *al.*, 1989 ; Kiniry et *al.*, 1989 ; Penning de Vries et *al.*, 1989 ; Allen et *al.*, 1998 ; Anonyme, 2002).

TABLE 5.2 – Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la phénologie de la variété DMR-ESR-W du maïs.

Paramètres	Valeurs
Cumul thermique Levée (SDJLevée)*	70°C jour ⁻¹
Cumul thermique Levée-Initiation paniculaire (SDJBVP)*	400°C jour ⁻¹
Cumul thermique Initiation paniculaire-Floraison (SDJRPR)*	330°C jour ⁻¹
Cumul thermique Floraison-Maturité cireuse (SDJMatu1)*	510°C jour ⁻¹
Cumul thermique Maturité Cireuse-Maturité totale (SDJMatu2)*	260°C jour ⁻¹
Température de base (TBase)	10°C
Température Optimale1 (TOpt1)	26°C
Température Optimale2 (TOpt2)	34°C
Température limite (TLim)	44°C
Température de Référence de Respiration de Maintenance (TempMaint)	25°C
Seuil Horaire où la floraison est immédiate (PPCrit)	11 Heures
Coefficient de sensibilité à la photopériode (PPSens)	5

Légende : * coefficients calculés sur la base des données expérimentales.

TABLE 5.3 – Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la biomasse de la variété DMR-ESR-W du maïs.

Paramètres	Valeurs
Pente de la relation de répartition BiomFoliaire-BiomAérienne (FeuilAeroPente)*	-5×10^{-5}
Base de la relation de répartition BiomFoliaire-BiomAérienne (FeuilAeroBase)*	0.6%
Pente de la relation de répartition BiomAérienne-BiomTotale (AeroTotPente)	1.5×10^{-5}
Base de la relation de répartition BiomAérienne-BiomTotale (AeroTotBase)	0.6%
Taux de réserve des graines transformées en biomasse (Tx-ResGrain)	0.55%
Taux de réallocation (TxRealloc)	0.7%
Poids moyen d'une graine (PoidsSecGrain)*	0.38 G
Coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (TxConversion)	$5.4 \text{ GMJ}^{-1} \text{J}^{-1}$
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, phase BVP (TxAssimBVP)	1%
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, phase Matu1 (TxAssimMatu1)	0.9%
Coefficient d'efficacité d'assimilation des feuilles, phase Matu2 (TxAssimMatu2)	0.7%
Coefficient de l'espèce pour le calcul du taux de transpiration (PFactor)	0.55
Coefficient cultural maximum (KcMax)	1.25
Coefficient moyen d'angle des feuilles (Kdf)	0.5
Respiration de Maintenance de la biomasse totale (TxResp-Maint)	0.01 Kg.ha^{-1}

Légende : * coefficients calculés sur la base des données expérimentales.

TABLE 5.4 – Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation de la mise en place de la surface foliaire de la variété DMR-ESR-W du maïs.

Paramètres	Valeurs
Surface massique des feuilles minimum (SLAmin)*	0.0014
Surface massique des feuilles maximum (SLAmin)*	0.007
Pente surface massique des feuilles (SLAPente)	0.4

Légende : * coefficients calculés sur la base des données expérimentales.

TABLE 5.5 – Paramètres utilisés dans la calibration du modèle SARRA-H pour la simulation du rendement potentiel de la variété DMR-ESR-W du maïs.

Paramètres	Valeurs
Poids moyen d'un grain (PoidsSecGrain)*	0.38 g
Coefficient d'évaluation du rendement potentiel (KRdt-PotA)	0.9

Légende : * coefficients calculés sur la base des données expérimentales.

5.2.5 Analyse des variabilités interannuelle et intrasaisonnière des rendements agricoles potentiels

Simulation des rendements potentiels entre 1971-2010

Les simulations ont concerné uniquement les stations de Niaouli et de Ouidah qui représentent la zone d'étude. Pour chaque année (1971-2010), une série de simulations a été réalisée en décalant d'une décade, de février à novembre, la recherche automatique de la date de semis. Nous avons ainsi obtenu 40 séries temporelles de rendements potentiels entre février et novembre. Cette expérience a également permis d'identifier *a posteriori*, pour la grande saison pluvieuse (de février à juillet) et pour la petite saison pluvieuse (d'août à novembre), le rendement potentiel maximal sous contrainte hydrique atteint chaque année.

Sensibilité des rendements potentiels à la date de semis

Pour analyser la sensibilité des rendements potentiels à la date de semis, nous avons, dans un premier temps, moyenné les 40 séries temporelles (1971-2010) de rendements potentiels simulés de manière à obtenir une série composite de rendements potentiels entre février et novembre. Dans un deuxième temps, nous avons constitué une série composite des dates de début de dessiccation des grains en adoptant la même démarche que celle ayant conduit à la réalisation de la série composite des rendements potentiels.

Définition des dates de début et de fin des saisons des pluies

Il n'existe pas de critère universellement retenu pour définir le démarrage et la fin des saisons des pluies. Les définitions utilisées reposent sur des considérations subjectives qui dépendent fortement de l'utilisateur (Balme et *al.*, 2005). Dans le cas de cette étude, l'évolution des dates de début et de fin des saisons des pluies a été analysée à partir de la méthode élaborée par Erpicum et *al.* (1988). Ces auteurs ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie (pluie > 1 mm) au cours d'une pentade (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de plus de sept jours. De même, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une pentade.

Poids des descripteurs pluviométriques dans la variabilité interannuelle des rendements

Pour identifier les descripteurs pluviométriques qui modulent la variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux, nous avons analysé la corrélation linéaire entre chaque descripteurs intrasaisonnier et les rendements potentiels maximaux annuels entre 1971 et 2010.

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Calibration du modèle SARRA-H

La figure 5.2 présente les résultats de la calibration et de la vérification du modèle SARRA-H pour la variété DMR-ESR-W du maïs. Les résultats de calibration montrent que le modèle arrive bien à reproduire les différentes dynamiques de biomasses aériennes, foliaires et du LAI (leaf area index) ainsi que l'estimation du rendement final. En effet, les courbes des valeurs simulées passent généralement à l'intérieur des marges d'erreur (écart-type) calculées à partir des observations. La capacité prédictive du modèle dans des situations contrastées, les rendements et biomasses variant presque du simple au double, est bien montrée dans la série des autres essais ; nous pouvons en conclure que le modèle est efficace pour simuler les rendements potentiels agricoles du maïs dans le contexte du Sud-Bénin.

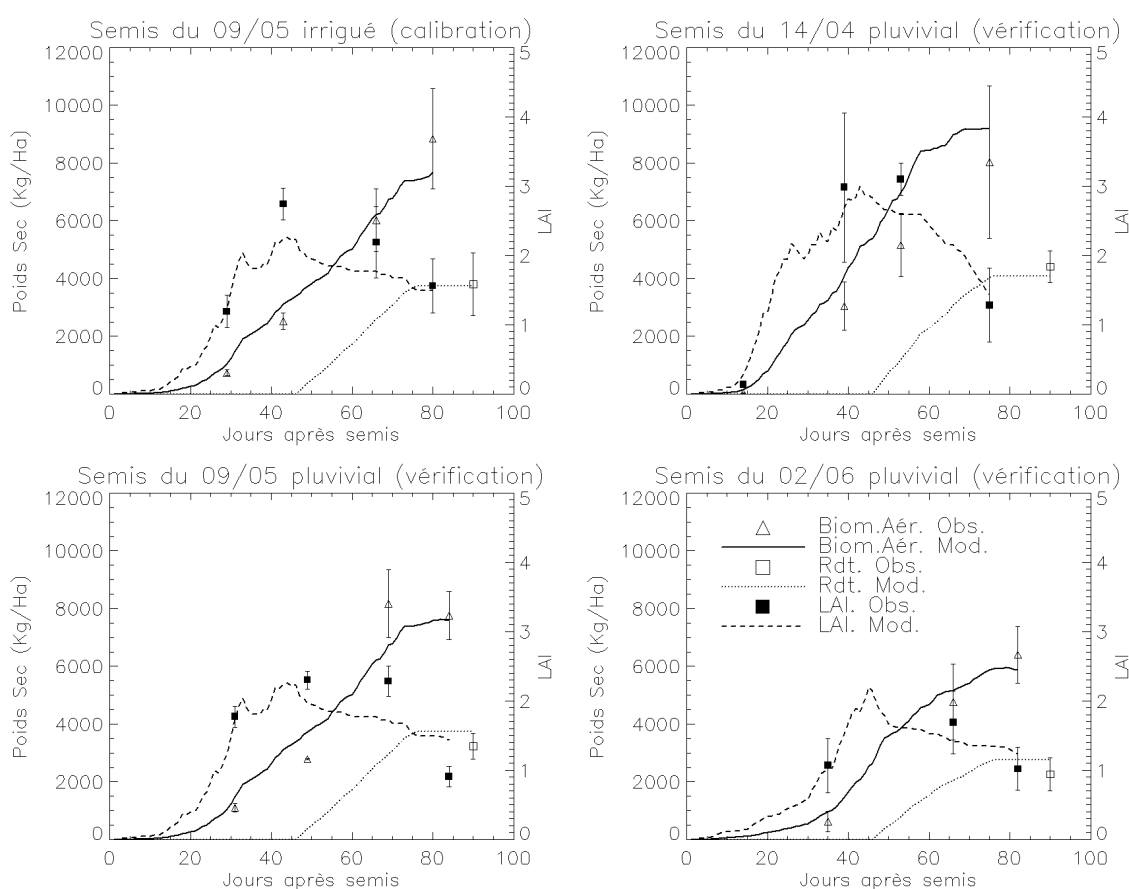


FIGURE 5.2 – Calibration et vérification du modèle SARRA-H.

5.3.2 Variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux

La figure 5.3 met en évidence une forte variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux avec un écart de 14% autour de la moyenne, quelles que soient la saison des pluies et la station considérée. Cette forte variabilité interannuelle a été également soulignée par Paeth et *al.* (2008) sur les rendements de maïs observés à l'échelle du Bénin entre 1970 et 2003. En dépit de cette variabilité importante, une certaine tendance est observable dans les séries chronologiques des rendements potentiels maximaux.

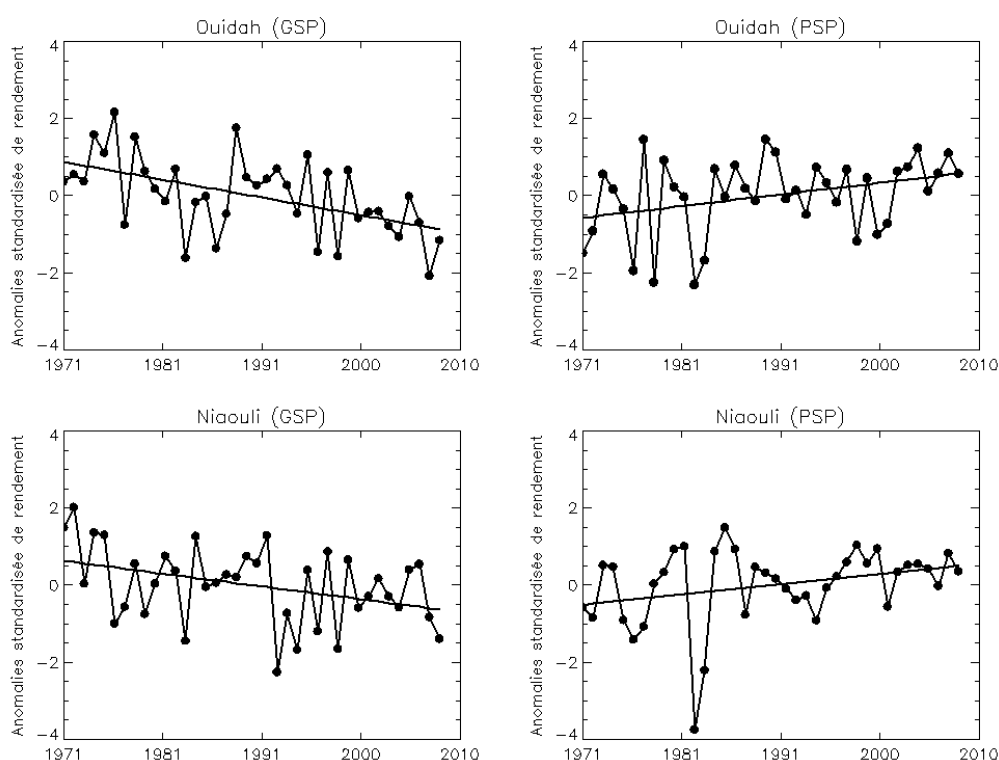


FIGURE 5.3 – Variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux entre 1971 et 2010 sur les stations de Niaouli et de Ouidah.

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies.

Ainsi, on observe une diminution tendancielle des rendements potentiels maximaux de la grande saison des pluies, alors que ceux de la petite saison des pluies

augmentent entre 1971 et 2010. Les rendements potentiels maximaux diminuent d'environ 21 kg/ha par an pendant la grande saison des pluies et augmentent de l'ordre de 15 kg/ha par an pendant la petite saison des pluies entre 1971 et 2010. Cette diminution des rendements potentiels pendant la grande saison des pluies contraste avec la nette progression des rendements annuels de maïs observés depuis 1970 sur l'ensemble du Bénin (Paeth et *al.*, 2008). Ce contraste peut s'expliquer par les échelles spatiale (moyenne sur l'ensemble du Bénin) et temporelle (moyenne sur l'année entière). Dans ce contexte, une certaine circonspection s'impose quand on étudie l'impact du climat sur les rendements agricoles, les résultats dépendant des échelles spatiales et temporelles considérées. En ce sens, les nombreux articles et rapports faisant état de projections futures des rendements en Afrique subsaharienne en réponse aux changements environnementaux (Challinor et *al.*, 2007) ne permettent pas de capitaliser sur des saisons de pluies aux conditions plus favorables, puisque ces articles se focalisent généralement sur des échelles spatio-temporelles larges.

5.3.3 Poids des descripteurs pluviométriques dans la variabilité interannuelle des rendements

Les coefficients de corrélations linéaires (Figure 5.4) montrent qu'au seuil de 5% (en se référant à la table de Bravais Pearson) les rendements potentiels maximaux sont corrélés positivement avec les cumuls pluviométriques (P), le nombre de jours pluvieux (N) et le cumul moyen des jours pluvieux (H) et négativement avec la durée moyenne des séquences sèches (SS). Toutefois, il faut souligner que pour la petite saison des pluies à Niaouli, les scores de corrélations entre les descripteurs P et H et les rendements ne sont pas significatifs au seuil de 5%. Cela montre que la relation qui lie le cumul pluviométrique au rendement n'est pas robuste, notamment en région guinéenne, même si elle est souvent mise en évidence dans les régions sahéliennes (Sultan et *al.*, 2005 ; Adejuwon, 2006 ; Berg, 2011). Au contraire, les séquences sèches semblent mieux expliquer la variabilité interannuelle des rendements dans la région d'étude quels que soient la saison des pluies et l'endroit considérés. Cela confirme l'assertion selon laquelle la précarité des précipitations dans le temps a des répercussions directes sur les cultures (Camberlin et Diop,

2003).

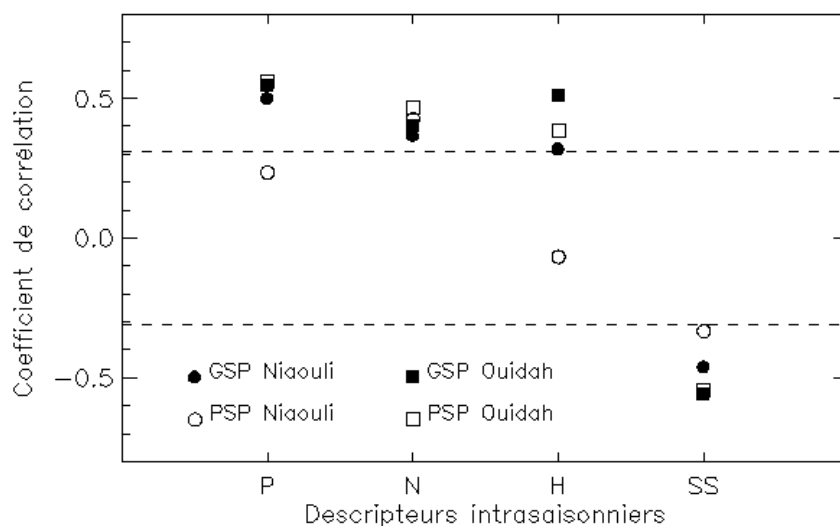


FIGURE 5.4 – Scores de corrélations linéaires simples entre chaque variable pluviométrique et les rendements potentiels maximaux du maïs simulés par le modèle SARRA-H sur la période 1971-2010. Les lignes pointillées matérialisent les bornes de significativité à 95% lues dans les tables de Bravais Pearson dans le cas de 40 années.

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies ; P=cumul pluviométrique, N=nombre de jours pluvieux, H=cumul moyen des jours pluvieux et ss=durée moyenne des séquences sèches

5.3.4 Variabilité interannuelle des descripteurs intrasaisonniers des saisons des pluies

Les liens entre les DIS et les rendements potentiels maximaux suggèrent d'analyser les tendances interannuelles des DIS de chaque saison afin d'expliquer la variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux. Le tableau 5.6 présente l'évolution des descripteurs intrasaisonniers des saisons de pluies en les moyennant sur les stations de Niaouli et de Ouidah. Il apparaît que depuis 1970, la grande saison des pluies est caractérisée par une succession de décennies excédentaires et déficitaires par rapport à sa moyenne interannuelle (550 mm). Quand on compare

TABLE 5.6 – Moyennes décennales des descripteurs intrasaisonniers des saisons des pluies moyennées sur les stations de Niaouli et de Ouidah.

DIS	Saisons	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
P (mm)	GSP	543,2	564,1	533,6	566,0
	PSP	185,3	249,2	225,2	302,3
N (jours)	GSP	31,9	30,1	28,3	29,5
	PSP	15,6	16,5	17,1	18,4
H (mm/jour)	GSP	17,1	18,3	18,7	19,5
	PSP	11,3	14,6	13,0	17,2
Dss (jours)	GSP	3,1	3,3	3,5	3,5
	PSP	4,1	3,9	3,8	4,0

Légende : P=cumul pluviométrique, N=nombre de jours pluvieux, H=cumul moyen des jours pluvieux et Dss=durée moyenne des séquences sèches ; GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies

les statistiques moyennes de 1971-1990 à celles de 1991-2010 pour la grande saison des pluies, il ressort que le nombre de jours pluvieux a diminué de 7%, le cumul moyen des jours pluvieux a augmenté de 8% et la durée moyenne des séquences sèches a augmenté de 12%. A l'inverse de la grande saison des pluies, la petite saison des pluies a enregistré un regain pluviométrique considérable (environ 20%) entre 1971-1990 et 1991-2010. Ce regain pluviométrique s'accompagne des augmentations du nombre de jours pluvieux d'environ 11% et du cumul moyen des jours pluvieux de l'ordre de 17%. En outre, on observe une relative diminution de la durée moyenne des séquences sèches d'environ 3%. Ces résultats indiquent que la grande saison des pluies et la petite saison des pluies ne sont pas affectées de la même manière par les forçages atmosphériques. Ce résultat confirme celui mis en évidence au Sud-Bénin par Allé et *al.* (2013a). Il apparaît donc, qu'après la sécheresse généralisée des années 1970 et 1980 qui a touché l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (L'hote et *al.*, 2002 ; Le Barbé et *al.*, 2002), la grande saison des pluies a continué à se dégrader, tandis que la petite saison des pluies s'est considérablement

améliorée, en l'occurrence en terme de distribution séquentielle des pluies. Ce fait peut alors expliquer la diminution et l'augmentation tendancielle des rendements potentiels maximaux respectivement pour la grande et la petite saison des pluies, puisque les rendements sont en partie liés à la durée moyenne des séquences sèches (Figure 5.4).

5.3.5 Stratégies de semis et risques de pertes de semis

Les figures 5.5 et 5.6 présentent la dynamique saisonnière du pourcentage de semis réussis sur la période d'étude (1971-2010) respectivement sur les stations de Niaouli et de Ouidah. Il est intéressant de noter que les pourcentages de semis réussis progressent avec l'installation des pluies et que les pourcentages de semis réussis les plus performants (au-delà de 90%) sont atteints dès 20 jours après la date de démarrage des pluies, quelles que soient la saison des pluies et la station considérées. On peut également observer que la méthode traditionnelle des agriculteurs qui consiste à semer le plus tôt possible en choisissant un seuil de pluie comme critère de décision pour le choix de la date de semis (Kouressy et *al.*, 2008), comporte d'importants risques d'échec de semis (5.5 et 5.6). Marteau et *al.* (2011) ont ainsi montré qu'au Niger, 22% des semis ont été perdus à cause de l'occurrence d'un épisode sec prolongé (supérieur à 7 jours) juste après le semis. En effet, nombre de ces événements pluvieux isolés peuvent être associés à l'instabilité induite par le passage du front intertropical (FIT) sur la région d'étude au mois de mars avec une forte probabilité de faux départ de la saison des pluies. Il en est de même pour la petite saison des pluies où le semis est fortement hypothéqué lorsqu'il est réalisé avant septembre.

Ainsi, dans un contexte où pour la culture de céréales, les populations rurales d'Afrique subsaharienne sont soumises à de fortes pressions financières du fait de l'absence de subventions et de crédits agricoles, de régulations des coûts (intrants, engrais, mécanisation...) et d'organisation du réseau (Forest et Clopes, 1994), il apparaît très préjudiciable de semer avant le démarrage effectif de la saison des pluies. Ce résultat confirme l'importance de la date de démarrage des pluies pour l'agriculture (Sultan et *al.*, 2005 ; Marteau et *al.*, 2011) qui a été soulignée très justement par les agriculteurs comme la priorité en termes d'indicateur climatique à

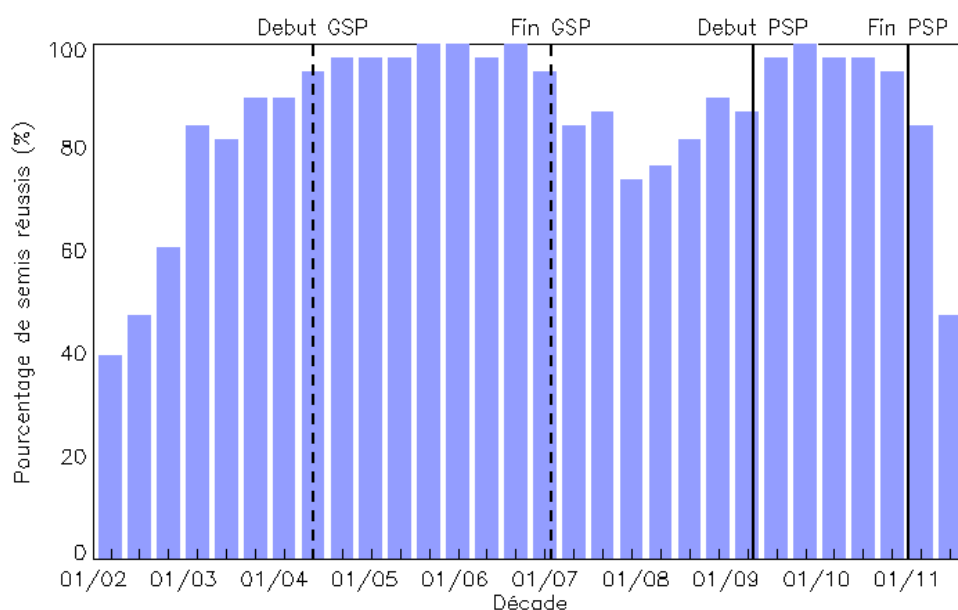


FIGURE 5.5 – Pourcentage de semis réussis entre février et Novembre sur la station de Niaouli.

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies

être inclus dans les systèmes de prévision actuels (Ingram et *al.*, 2002).

5.3.6 Fenêtres de semis et optimisation des rendements pour une double saison des pluies

Les figures 5.7 et 5.8 présentent la série composite des rendements potentiels simulés en fonction de la date de semis respectivement pour les stations de Niaouli et de Ouidah. Ces figures montrent une progression saisonnière des rendements au fur et à mesure que la date de semis se rapproche de mi-avril, où les rendements atteignent un premier pic (90%). Ensuite, selon que la date de semis s'éloigne de mi-avril, les rendements diminuent progressivement pour atteindre un minimum en fin juin (60%). La dynamique saisonnière de la petite saison des pluies est également caractérisée par une progression des rendements au fur et à mesure que la date de semis se rapproche de la première décade de septembre où les rendements atteignent un deuxième pic (95%). Dès que la date de semis s'éloigne de la première

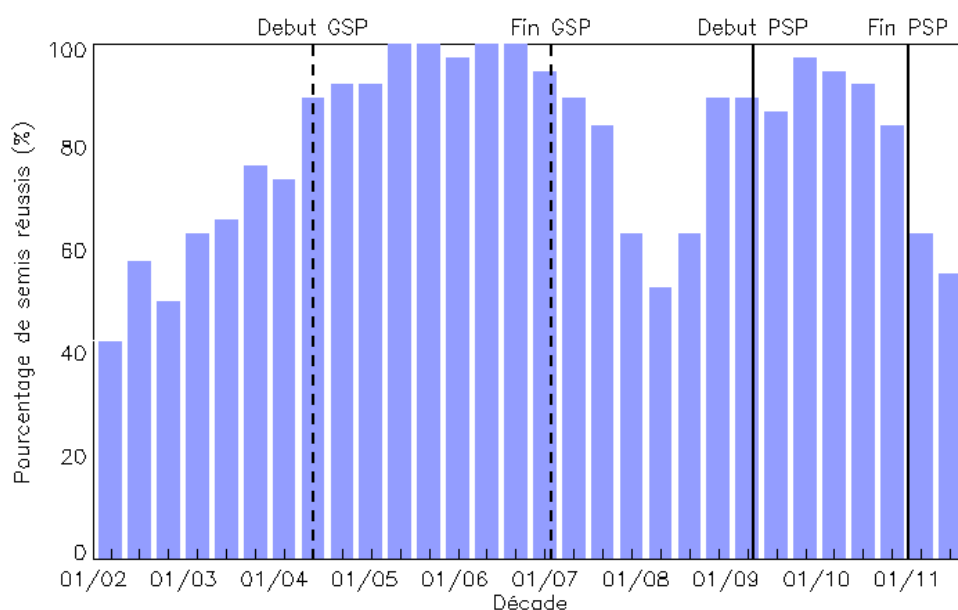


FIGURE 5.6 – Pourcentage de semis réussis entre février et Novembre sur la station de Ouidah.

Légende : Idem que pour la figure 5.5

décade de septembre, les rendements chutent brutalement jusqu'à fin novembre, ce qui s'explique par la courte durée de cette saison au regard de la durée du cycle de la plante cultivée (90 jours). On observe une certaine stabilité des rendements potentiels autour des pics. Cette stabilité au sommet peut s'expliquer en partie par la faible sensibilité du rendement aux stress hydriques qui surviennent au cours des premiers stades phénologiques de développement des cultures (Rockström et de Rouw, 1997). Il apparaît donc que les dates de semis situées autour de mi-avril et de début septembre sont celles qui généralement offrent les rendements potentiels les plus élevés respectivement pour la grande saison des pluies et la petite saison des pluies.

Cependant, le choix d'une période de semis ne peut se faire uniquement sur la base des seuls stress hydriques. Des pertes de rendement peuvent être aussi imputées à de nombreuses contraintes biotiques (maladies, attaque des rongeurs et oiseaux) liées au fait que la phase de dessiccation des grains débute avant la fin des saisons des pluies (Kouressy et *al.*, 2008). Ainsi, les agriculteurs au Sud-Bénin enre-

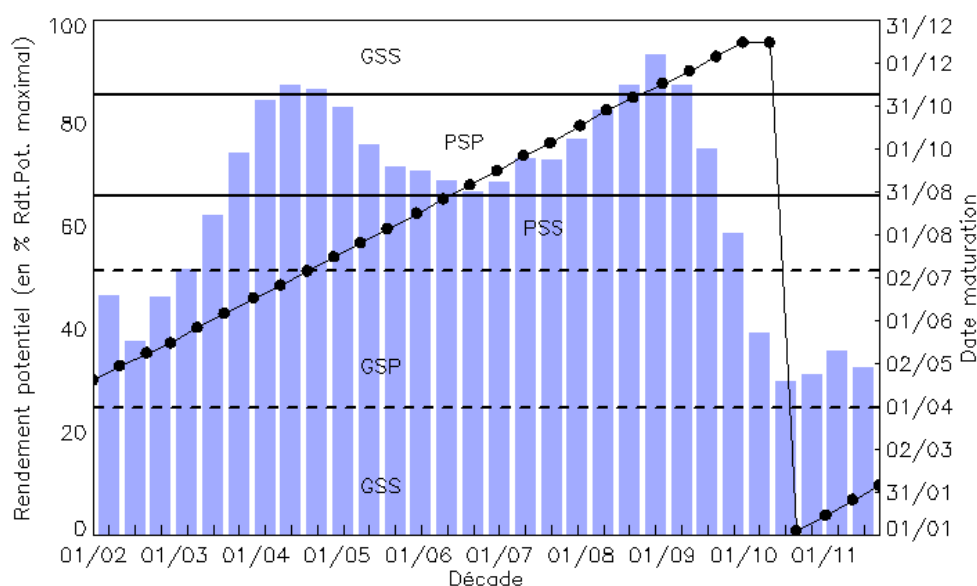


FIGURE 5.7 – Evolution des rendements potentiels (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) et des dates de début de la phase de dessiccation des grains en fonction de la date de semis à la station de Niaouli pour la période 1971-2010.

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies ; PSS = petite saison sèche ; GSS = grande saison sèche ; histogrammes = moyenne composite de rendements simulés (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) ; points = dates de début de la phase de dessiccation des grains ; lignes discontinues = début et fin de la grande saison des pluies ; lignes continues = début et fin de la petite saison des pluies.

gistrent chaque année des pertes post-récoltes allant de 20 à 50%, seulement après 6 mois de stockage (Adégbola et *al.*, 2011). Pour la grande saison des pluies, lorsqu'on sème avant fin avril, la phase de dessiccation des grains débute avant la fin de la grande saison des pluies dans le cas d'une variété de 90 jours (Figures 5.7 et 5.8). On s'affranchit de ce risque en semant en mai. Cependant, l'on perd en rendement, quoique faiblement. Toutefois, d'après De Rouw (2004), la priorité des paysans n'est pas d'obtenir le plus fort rendement une année donnée, mais de réduire les risques afin d'être garantis d'un rendement minimal chaque année. Quant aux semis effectués en septembre, la phase de dessiccation des grains ne débute qu'après la fin de la petite saison des pluies. Ainsi, le mois de septembre apparaît comme une

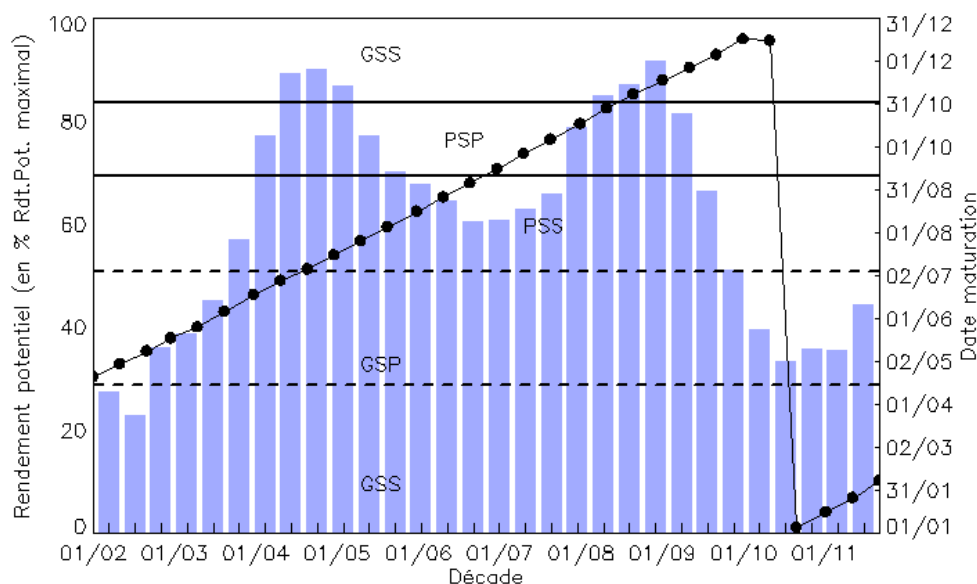


FIGURE 5.8 – Evolution des rendements potentiels (exprimés en pourcentage de rendements potentiels maximaux) et des dates de début de la phase de dessiccation des grains en fonction de la date de semis à la station de Ouidah pour la période 1971-2010.

Légende : Idem que pour la figure 5.7.

période favorable pour le semis de la deuxième saison des pluies, en l’occurrence sa première décade. Cette dernière coïncide avec le démarrage de la petite saison des pluies, montrant ainsi que la variété du maïs de 90 jours semble bien adaptée à la durée de ladite saison.

En revanche, en comparant le démarrage de la grande saison des pluies (première décade d’avril) avec la période de semis optimale de cette saison pour la variété DMR-ESR-W du maïs dans la région d’étude (première moitié de mai), il apparaît que les pluies débutent un mois environ avant la période de semis. Ce décalage montre que malgré son rétrécissement, après 1970 (Allé et *al.*, 2013a), la durée de la grande saison des pluies ne constitue pas un facteur restrictif pour la maïsiculture de cycle long (120 jours) dans la région d’étude. Un constat similaire a été fait par Noufé et *al.* (2011) en Côte d’Ivoire. En effet, l’utilisation d’une variété de maïs de 120 jours pour la grande saison des pluies peut reculer la période de semis optimale d’environ un mois, coïncidant de fait avec la date de démarrage des pluies où le

pourcentage de semis réussis devient très performant. En outre, cela correspondrait davantage à la stratégie des agriculteurs qui consiste à semer le plus tôt possible (Kouressy et al., 2008). Par ailleurs l'utilisation d'une variété à cycle long (120 jours) peut également réduire la perte d'azote dans le sol induite par les processus de lessivage et de dénitrification (Blondel, 1971) et maîtriser les adventices (Andrews et Bramel-Cox, 1994 ; Vaksman et al., 1996) à l'inverse de la variété de 90 jours du fait du décalage entre le début de la grande saison des pluies et la période de semis optimale de cette saison pour ladite variété.

5.4 Conclusion de chapitre

La présente étude met en lumière l'impact de la variabilité pluviométrique sur la culture du maïs sur deux saisons des pluies caractérisées par deux dynamiques atmosphériques différentes. Lorsqu'on considère la grande saison des pluies, l'analyse des séries chronologiques 1971-2010 des rendements potentiels maximaux met en évidence une baisse continue de ces rendements, alors qu'ils sont en augmentation sur la petite saison des pluies. Ces tendances s'expliquent essentiellement par la qualité de la distribution des pluies au sein de la saison. En effet, la grande saison des pluies enregistre depuis les années 1970 une dégradation continue de la distribution séquentielle des pluies, alors qu'à l'inverse, cette distribution s'améliore sensiblement sur la petite saison des pluies. Ce résultat peut être utile pour orienter les efforts d'adaptation relatifs à la grande saison des pluies (adaptation variétale, gestion de l'eau, fertilisation...), mais aussi pour revaloriser la petite saison des pluies auprès des agriculteurs qui ont généralement eu un intérêt limité pour cette saison.

La présente étude met en outre en évidence les différents niveaux de risques liés à la gestion du calendrier agricole. Elle ouvre ainsi tout un ensemble d'opportunités de stratégies agricoles en fonction des choix de risques et/ou de contraintes de gestion d'une exploitation. Elle permet également une analyse plus adaptée des fenêtres de semis et de récolte en intégrant, au-delà d'une analyse purement climatique, les relations Eau-Sol-Plante. Les pourcentages de semis réussis les plus performants (au-delà de 90%) sont atteints avec la date de démarrage des pluies montrant ainsi l'importance de celle-ci dans l'agriculture. Quant aux rendements

potentiels, ils sont maximums en semant dans la deuxième décennie d'avril et la première décennie de septembre respectivement pour la grande saison des pluies et la petite saison des pluies. Cependant, en considérant les contraintes biotiques dans le choix de la période de semis, il apparaît que la période de moindre risque pour semer est la première moitié de mai relativement à la grande saison des pluies et la première moitié de septembre relativement à la petite saison des pluies. Toutefois, en comparant le démarrage des pluies (début avril) avec la période de semis de la grande saison des pluies (première moitié de mai), on se rend compte que les pluies débutent un mois environ avant la période de semis. Ce décalage soulève donc la question de l'adaptation des variétés de maïs à cycle court (75 à 90 jours) à la grande saison des pluies. En effet, il est probable qu'une variété de maïs à cycle plus long (110 à 120 jours), où la principale différence de longueur de cycle se situe sur les premières phases phénologiques, soit plus adaptée à la grande saison des pluies. Toutefois, des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Quant à la petite saison des pluies, la variété de cycle de 90 jours semble bien adaptée à cette saison.

Discussion générale

Cette thèse vise notamment à répondre à deux questions :

- quelle est la cohérence, par rapport aux observations climatiques, des perceptions, par les producteurs agricoles, des changements climatiques et de leurs impacts agronomiques ?
- quelle est la pertinence des mesures d'adaptation aux changements climatiques adoptées par les producteurs au regard de l'évolution du climat ?

Dans les différents chapitres développés, nous avons tenté de répondre à ces questions en nous focalisant sur des aspects spécifiques. Le présent chapitre fait la synthèse des principaux résultats mis en évidence dans les chapitres précédents et les discute au regard de la littérature.

6.1 Synthèse des changements climatiques

6.1.1 Les modifications du régime pluviométrique

A l'instar de l'Afrique de l'Ouest (Servat *et al.*, 1999 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; l'Hôte *et al.*, 2002), les années 1970 et 1980 ont correspondu sur le plateau d'Allada à un fort déficit pluviométrique pouvant atteindre 20% selon la saison des pluies et l'échelle spatiale considérées (Chapitre 4). Ce déficit est davantage la conséquence d'une diminution de l'occurrence des pluies que d'une baisse de leurs intensités. Ce fait est en phase avec les résultats de Le Barbé *et al.* (2002) et de Lebel et Ali (2009) sur l'Afrique de l'Ouest. Dans les années 1990 et 2000, le déficit pluviométrique s'est amoindri, particulièrement pendant la petite saison des pluies qui est alors redevenue autant humide, voire plus, que pendant les années 1950 et 1960. Ce regain pluviométrique annonce la fin de la période sèche dans la région d'étude durant les années 1990, comme l'ont estimé Ozer *et al.* (2003), Niang *et al.* (2008),

Frappart et *al.* (2009) et Ozer et *al.* (2009) sur le Sahel. Toutefois, Lebel et Ali (2009) ont montré que la reprise des pluies est partielle sur le centre et l'est du Sahel, l'Ouest demeurant plus sec. L'intérêt de la présente étude est qu'elle montre que dans la région d'étude, le regain pluviométrique des années 1990 et 2000 est plus marqué sur la petite saison des pluies que sur la grande, modifiant ainsi « l'équilibre pluviométrique » précédemment établi, tel que souligné par Servat et *al.* (1999) sur l'Afrique de l'Ouest non sahélienne.

En dépit de cette reprise pluviométrique sur le plateau d'Allada, le nombre de jours pluvieux présente une diminution tendancielle continue après 1990 sur la grande saison des pluies, alors qu'il progresse nettement sur la petite saison des pluies (Chapitre 4). Les évolutions interannuelles du nombre de jours pluvieux ont des conséquences sur les caractéristiques des saisons des pluies. Ainsi, la durée de la grande saison des pluies a diminué d'environ 30% après 1970 du fait d'un début tardif des pluies. Un rétrécissement de la saison des pluies a également été observé au Sahel (Diop, 1996 ; Camberlin et Diop, 2003 ; Sané et *al.*, 2008 ; Kniveton et *al.*, 2008 ; Frappart et *al.*, 2009), mais aussi en région guinéenne, telle que la Côte d'Ivoire (Noufé et *al.*, 2011). En revanche, la durée de la petite saison des pluies est restée globalement stable sur le plateau d'Allada entre 1951 et 2010. Cette stabilité a également été observée dans la région de Cotonou par Lawin et *al.* (2013). Néanmoins, en considérant l'ensemble du Sud-Bénin, on s'aperçoit que la petite saison des pluies s'est allongée de plus de 30% après 1970 du fait de son démarrage précoce (Chapitre 2). Cet allongement contraste avec le raccourcissement observé dans d'autres régions guinéennes tel que le Centre de la Côte d'Ivoire (Koné, 1991 ; Noufé et *al.*, 2011). Les dynamiques interannuelles du nombre de jours pluvieux des deux saisons pluvieuses ont également influencé la distribution séquentielle des pluies en leur sein. Ainsi, après l'allongement des séquences sèches observé durant les années sèches 1970 et 1980 au sein des deux saisons pluvieuses, la grande saison des pluies a continué à enregistrer un allongement des séquences sèches pendant que ces dernières reviennent à leur niveau de 1950-1960 au sein de la petite saison des pluies. Il convient de souligner qu'Agbossou et *al.* (2012) avaient déjà montré une augmentation générale de la probabilité d'occurrence de deux décades sèches successives, traduisant ainsi un allongement des séquences sèches, entre 1951-1970 et 1971-1990 sur l'ensemble du Bénin. Cependant, la présente étude fait

ressortir, au delà des travaux d'Agbossou et *al.* (2012), qu'après 1990 l'allongement des séquences sèches a continué au sein de la grande saison des pluies, alors qu'il régresse au sein de la petite saison des pluies. Au regard de tous ces contrastes entre la grande et la petite saison des pluies, il apparaît que ces deux saisons pluvieuses ne sont pas affectées de la même manière par les forçages atmosphériques.

6.1.2 Le réchauffement climatique et les changements de vitesses de vents

En ce qui concerne les changements des températures, le réchauffement climatique planétaire est également perceptible dans la région d'étude et sur toutes les saisons de l'année. Le taux d'accroissement annuel est de l'ordre de 0.047°C . Cette valeur est nettement plus élevée que celle trouvée par les projections du GIEC (2007) qui prévoient pour l'Afrique entière un réchauffement général compris entre 0.5 et 1°C par siècle, pouvant aller par endroits jusqu'à 1.5°C . Ce réchauffement est également plus marqué que celui relevé sur l'Afrique tropicale (une augmentation de 0.15°C par décennie entre 1970 et 2010) par Collins (2011). Il apparaît donc que le réchauffement climatique planétaire ne se manifeste pas de la même façon partout.

Quant aux vitesses instantannées maximales des vents, la tendance est à la baisse quelle que soit la saison considérée dans l'année. Les vitesses instantannées maximales journalières de vent baissent de 0.031 m/s par an. La fréquence des vents des classes « modérés-fort » à « fort coups de vents » a régulièrement baissé depuis les années 1960 au profit des vents des classes inférieures, notamment « légers » à « modéré ». Ces résultats sont originaux et majeurs car l'analyse de la variabilité interannuelle des vitesses instantannées maximales journalières des vents est encore rare en Afrique de l'Ouest en général et au Bénin en particulier. Les études sont souvent orientées vers l'analyse fréquentielle des vitesses moyennes journalières ou des directions des vents pour des fins d'établissement de carte de potentiel éolien des régions, à l'instar des travaux de Gbaguidi et *al.* (2011).

6.1.3 Les impacts du climat sur la maïsiculture

Les conséquences des changements climatiques, en premier lieu pluviométriques, sur la maïsiculture dans la zone d'étude se traduisent, en termes de rendements potentiels, par une diminution de ces derniers pendant la grande saison des pluies et leur augmentation pendant la petite saison des pluies. Cela est un résultat important, puisqu'il montre que les impacts du climat sur l'agriculture peuvent différer d'une saison des pluies à l'autre. De la même manière, Noufé et *al.* (2011) indiquent que la baisse pluviométrique en Côte d'Ivoire n'a pas eu le même impact selon qu'il s'agit de la grande ou de la petite saison des pluies. Selon ces auteurs, la diminution de la durée de la première saison culturale ne constitue pas un facteur restrictif de premier plan pour la maïsiculture de cycle moyen à court (120 à 90 jours). En revanche, la production du maïs en second cycle semble compromise du fait de la courte durée de la petite saison des pluies après 1970. Ainsi, dans une perspective de changement global du climat où il est prévu que les rendements agricoles annuels baissent en moyenne de 10% sur l'Afrique de l'Ouest dans le futur par rapport au climat actuel (Roudier et *al.*, 2011), il apparaît important de considérer l'échelle saisonnière dans les études d'impacts agronomiques du climat et dans l'élaboration des stratégies d'adaptation.

6.2 Synthèse des perceptions des changements climatiques

6.2.1 Perceptions des changements des précipitations

Le tableau 6.1 synthétise les perceptions des CE et les tendances relatives aux changements pluviométriques de la grande et de la petite saison des pluies. Les perceptions, par les CE, des changements pluviométriques de la grande et de la petite saison des pluies sont très proches, puisqu'elles ne divergent que par rapport au sens du changement du début des saisons pluvieuses. Pour les CE, la grande saison des pluies débute tardivement alors que la petite saison des pluies démarre précocement par rapport au passé, ce qui semble logique au regard des observations pluviométriques. Les CE attribuent ainsi globalement les mêmes change-

TABLE 6.1 – Perceptions des CE et tendances pluviométriques observées sur la grande et la petite saison des pluies à l'échelle du plateau d'Allada.

Variables	GSP			PSP		
	Percep	P1→P2	P2→P3	Percep	P1→P2	P2→P3
P	-	-	+	-	-	+
H	+	-	+	+	-	+
N	-	-	-	-	-	+
Fss	+	+	+	+	+	-
Deb	-	-	+	+	=	+
Fin	+	=	-	+	+	-

Légende : GSP = grande saison des pluies ; PSP = petite saison des pluies ; P1→P2 = tendances pluviométriques observées entre 1951-1970 et 1971-1990 ; P2→P3 = tendances pluviométriques observées entre 1971-1990 et 1991-2010 ; Percep = Perceptions des 201 chefs d'exploitation (CE) ; - = diminution ou tardiveté ; + = augmentation ou précocité ; = = pas de changement.

ments à la grande et à la petite saison des pluies. Les perceptions des CE recueillies sur le plateau d'Allada sont globalement en phase avec celles rapportées dans la littérature (West et *al.*, 2008 ; Apata et *al.*, 2009 ; Mertz et *al.*, 2009 ; Nielsen et Reenberg, 2010 ; Ouedraogo et *al.*, 2010 ; Gnanglè et *al.*, 2011 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Vissoh et *al.*, 2012 ; Agossou et *al.*, 2012), puisqu'elles soulignent toutes, un déficit pluviométrique qui s'accompagne d'une baisse d'occurrence et d'une mauvaise distribution temporelle des pluies. Toutefois, soulignons qu'au Cameroun seulement 25% des personnes interrogées estiment que les pluies ont chuté contre 27% qui ne perçoivent pas de changements pluviométriques (Dinar et *al.*, 2008). La présente thèse a l'avantage de quantifier le niveau de convergence entre les perceptions des changements pluviométriques et les tendances pluviométriques scientifiquement prouvées.

Ainsi, le taux de convergence entre les perceptions et les tendances pluviométriques observées à l'échelle du plateau d'Allada entre 1951-1970 et 1971-1990 est de 67% quelle que soit la saison des pluies (grande ou petite) considérée. En revanche,

ce taux n'est plus que de 50% et 34% lorsqu'on considère les tendances observées entre 1971-1990 et 1991-2010, respectivement pour la grande saison des pluies et la petite saison des pluies. Il apparaît donc que les CE sont plus sensibles aux changements pluviométriques survenus entre 1951-1970 et 1971-1990 et ne perçoivent pas le retour de conditions plus humides sur le plateau d'Allada. Un constat similaire a également été fait par West et *al.* (2008) et Ouedraogo et *al.* (2010) au Burkina Faso. En Ouganda, la majorité des enquêtés (63% des hommes et 53% des femmes) pensent que les conditions climatiques vont devenir encore plus précaires (Kisauzi et *al.*, 2012). Il en est de même au Zimbabwe où les agriculteurs estiment que le climat va encore se dégrader d'ici une dizaine d'années (Moyo et *al.*, 2012). Ainsi, dans un contexte relatif d'amélioration des conditions pluviométriques, les populations rurales d'Afrique subsaharienne ont globalement une vision pessimiste de l'évolution du climat. Par ailleurs, Mertz et *al.* (2011) indiquent que cette perception négative de l'évolution du climat présente un gradient Est-Ouest, les agriculteurs étant plus pessimistes au Sénégal qu'au Nigéria sur l'évolution du climat. Ce gradient Est-Ouest est corroboré par les travaux de Lebel et Ali (2009) qui montrent des différences dans le retour de la pluviométrie entre l'est et l'ouest du Sahel, l'Ouest demeurant plus sec. On peut alors supposer qu'il y a un lien entre, d'une part la très grande sensibilité des CE par rapport aux changements pluviométriques observés entre 1951-1970 et 1971-1990 sur le plateau d'Allada et, d'autre part, le regain pluviométrique, relativement faible, des années 1990 et 2000, en l'occurrence pour la grande saison des pluies. Néanmoins, le changement d'échelle de régionale (plateau d'Allada) à locale (station de Niaouli) améliore la perception du retour des pluies des CE du moment où ces derniers sont situés à proximité de la station de Niaouli (Chapitre 4). Cela est particulièrement vrai pour la petite saison des pluies dont la variabilité spatiale est très importante. En effet, lorsqu'on considère les CE situés dans un rayon de 10 km autour de la station de Niaouli, leurs perceptions convergent à 67% vers les changements pluviométriques relatifs à la petite saison des pluies observés entre 1971-1990 et 1991-2010 à cette station, contre 34% et 17% pour les CE situés dans un rayon respectivement compris entre 11 et 25 km et 26 et 40 km.

6.2.2 Perceptions des changements de températures et de vitesses de vents

Les CE ressentent le réchauffement climatique pendant les saisons sèches (novembre à mars et août), mais pas sur les saisons pluvieuses. Ce fait est contraire aux observations climatiques faites sur la zone d'étude qui montrent une augmentation des températures sur toutes les périodes de l'année. Cependant, ce n'est pas la première fois qu'une étude rapporte que les agriculteurs ne sont pas sensibles au réchauffement climatique. Apata et *al.* (2009) ont indiqué qu'au Niger les enquêtés ne perçoivent aucun changement de température, mais dans le même temps, Dinar et *al.* (2008) rapportent sur ce même pays que 50% des enquêtés estiment que le climat se réchauffe, contre 10% qui perçoivent une baisse des températures. Par ailleurs, au Cameroun, 29% des enquêtés ne perçoivent aucun changement de température contre 22% qui évoque la hausse de température (Dinar et *al.*, 2008). Il apparaît donc que la perception du réchauffement climatique n'est pas unanime, même au sein d'un même pays, alors que les études climatologiques s'accordent sur l'évidence du réchauffement climatique en Afrique de l'Ouest (New et *al.*, 2006 ; GIEC, 2007 ; Collins, 2011).

De la même manière, les perceptions des CE des changements dans les vents ne concordent pas avec les observations climatiques effectuées sur le plateau d'Allada. En effet, les CE estiment que les vents sont devenus plus violents pendant les saisons pluvieuses et la petite saison sèche, mais qu'ils s'affaiblissent pendant la grande saison sèche. Au contraire, les observations indiquent une diminution des vitesses instantanées maximales journalières des vents sur toutes les périodes de l'année. Cette perception de l'augmentation de la fréquence des vents violents est également rapportée par des études antérieures sur le Sud-Bénin (Agossou et *al.*, 2012 ; Vissoh et *al.*, 2012) et plus largement en Afrique (Mertz et *al.*, 2009 ; Nielsen et Reenberg, 2010 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Kisauzi et *al.*, 2012). On voit donc que la perception de l'augmentation de la fréquence des vents violents est quasi unanime en Afrique de l'Ouest. Cependant des études climatologiques des vitesses des vents ne sont pas encore courantes en Afrique de l'Ouest pour confirmer ou infirmer les perceptions des populations. En ce sens, la mise en évidence des divergences entre les perceptions des CE des changements dans les vents et les observations

climatiques sur le plateau d'Allada est un résultat important qui soulève la question de la vulnérabilité des cultures aux effets de vents. A ce sujet, Mertz et *al.* (2009) rapportent que pour les enquêtés, le vent est le facteur qui a le plus d'effets négatifs sur les cultures et le bétail, devant les fortes pluies.

6.2.3 Perceptions des causes des changements climatiques

Plusieurs causes sont avancées par les CE pour expliquer les changements climatiques (chapitre 3). Cependant, la déforestation est la première cause des changements climatiques aux yeux des CE sur le plateau d'Allada. Ce résultat est en contradiction avec les travaux de Vissoh et *al.* (2012) sur le Sud-Est du Bénin. En effet, ces auteurs indiquent qu'un faible pourcentage des causes évoquées par les enquêtés est attribué aux facteurs anthropiques. De façon générale en Afrique, la perception des causes des changements climatiques revêt diverses formes et est le plus souvent liée aux normes et aux croyances locales comme l'ont rapporté Brou et *al.* (2005) en Côte d'Ivoire, Kisauzi et *al.* (2012) en Ouganda, Vissoh et *al.* (2012) au Bénin, Tambo et Abdoulaye (2012) au Nigéria. Dans le cas du plateau d'Allada, le fait que les CE citent la déforestation comme principale cause des changements climatiques peut s'expliquer par le fait que ces derniers lient l'occurrence des pluies à la présence des grands arbres dans leur village. Or, depuis quelques décennies, le plateau d'Allada connaît un fort taux de déboisement aux fins de fabrication de charbon de bois ou pour la recherche de nouvelles terres arables en vue d'augmenter la production agricole qui s'amenuise du fait de la sécheresse et l'appauvrissement des sols. Selon Charney (1977), le déboisement peut effectivement engendrer des bouleversements pluviométriques sur une région donnée en induisant une augmentation d'albédo de surface. Cet auteur a montré qu'une augmentation d'albédo de surface par désertification (déboisement) peut, en réduisant l'énergie disponible dans la colonne atmosphérique, induire un réchauffement par subsidence qui va inhiber la convection et maintenir ou déplacer la zone de convergence intertropicale vers le sud, l'assèchement de surface consécutif va alors entraîner à nouveau une augmentation de l'albédo. La perception des CE selon laquelle le déboisement est à l'origine des perturbations climatiques est en partie justifiée.

6.2.4 Perceptions des conséquences agronomiques des changements climatiques

Sur le plan agricole, l'ensemble des CE a constaté la baisse des rendements agricoles, notamment ceux du maïs quelle que soit la saison des pluies considérée. Les perceptions des chefs d'exploitation (CE) enquêtés ne corroborent donc pas l'augmentation des rendements agricoles potentiels simulés. Cette divergence peut s'expliquer par les multiples contraintes : financement, disponibilités en main d'œuvre et intrants, auxquelles les agriculteurs doivent faire face (Forest et Clopes, 1994).

Sur le plan sanitaire, les producteurs ont remarqué une hausse du taux des personnes souffrant de paludisme, qui serait favorisée par la hausse des températures. Ce type de perception n'est pas souvent rapportée dans la littérature. Cela confirme les résultats de Githeko et *al.*, (2000) qui estiment que le réchauffement du climat pourrait avoir une influence directe sur l'épidémiologie des maladies à transmission vectorielle, dont le paludisme dans les régions tropicales et subtropicales. En effet, lorsque le climat se réchauffe, les moustiques femelles adultes digèrent plus rapidement le sang et s'alimentent plus fréquemment (Gillies, 1953), ce qui accroît l'intensité de la transmission. De même, avec l'élévation de la température, les parasites du paludisme achèvent plus vite leur incubation extrinsèque dans l'organisme du moustique (Turell, 1989), ce qui augmente la proportion de vecteurs infectants.

Eu égard à tous les résultats obtenus sur les perceptions des changements climatiques chez les CE, notre hypothèse selon laquelle lesdites perceptions s'accordent avec les observations climatiques, ne peut être confirmée à tout point de vue. En effet, si les changements pluviométriques évoqués par les producteurs sont globalement en phase avec les observations pluviométriques relatives à la grande saison des pluies, elles le sont moins avec les observations pluviométriques relatives à la petite saison des pluies, quelle que soit l'échelle spatiale considérée, en ce sens que les CE ne sont pas sensibles au retour de conditions plus humides pendant les années 1990 et 2000, en particulier au cours de la petite saison des pluies. En outre, le réchauffement climatique et la diminution de la vitesse des vents sont mal perçus, en l'occurrence pendant les saisons pluvieuses.

6.3 Synthèse des mesures d'adaptation

Le tableau 6.2 regroupe les principales mesures d'adaptation agricoles suivant la catégorisation de Chuku et Okoye (2009).

TABLE 6.2 – Récapitulatif des mesures d'adaptation aux changements climatiques spécifiques à l'agriculture sur la base de la classification de Chuku et Okoye (2009)

Pratiques de production	Gestion des revenus
<ul style="list-style-type: none"> – Modification des dates de semis – Adoption de variétés de maïs à cycle plus court – Adoption de nouvelles cultures – Fertilisation – Labour – Utilisation des bas-fonds 	<ul style="list-style-type: none"> – Initiation d'activités secondaires – Transformation agroalimentaire – Fabrication de charbon de bois – Elevage

En effet, selon Chuku et Okoye (2009), les options d'adaptation disponibles en agriculture pour faire face aux changements climatiques peuvent être classées en quatre grandes catégories : (i) la gestion des revenus/actifs, (ii) les assurances et programmes gouvernementaux, (iii) les pratiques de production des exploitations et (iv) le développement technologique. Dans le cadre de cette étude, les mesures d'adaptation recensées sont essentiellement liées à l'agriculture, notamment aux pratiques de production et aux techniques de gestion des revenus. Les mesures d'adaptation spécifiques aux changements de température et de vent sont rares. Cela peut s'expliquer par le fait que les variations de température et de vent ont probablement peu d'effets sur les activités agricoles dans la zone d'étude par rapport aux changements pluviométriques. Cela peut également traduire la limite des moyens d'adaptation dont disposent les maïsiculteurs pour faire face aux changements climatiques. Néanmoins, environ 25% des CE ont planté des arbres dans et autour de leurs exploitations pour lutter contre le réchauffement climatique. Les arbres tels que le teck servent également de brise-vent, limitant ainsi la verse des plantes de maïs. Des mesures similaires ont également été adoptées au Nigéria

(Tambo et Abdoulaye, 2012). En dehors des mesures d'adaptation individuelles, les producteurs ont adopté également des mesures d'adaptation collectives telles que les prières et rituels aux divinités, « hêviosso », dieu du ciel, « sakpata », dieu de la terre et « Dan », le serpent reliant le ciel et la terre. Des mesures d'adaptation aux changements climatiques similaires ont également été rapportées par d'autres auteurs sur différentes régions du pays (Abidji et *al.*, 2012 ; Agossou et *al.*, 2012 ; Vissoh et *al.*, 2012), mais aussi en Afrique de l'Ouest (Brou et *al.*, 2005 ; Deressa et *al.*, 2009 ; Bryan et *al.*, 2009 ; Ouédraogo et *al.*, 2010 ; Tambo et Abdoulaye, 2012 ; Below et *al.*, 2012 ; Fosu-Mensah et *al.* 2012).

L'adaptation variétale et la modification des dates de semis apparaissent comme les mesures les plus adoptées par les CE sur le plateau d'Allada. Ces mesures sont également les plus adoptées au Nigéria (Tambo et Abdoulaye, 2012) et au Burkina Faso (Ouédraogo et *al.*, 2010). L'adoption massive des nouvelles variétés de maïs à cycle court est peut-être liée au fait que l'agriculture béninoise est caractérisée par l'inexistence d'un schéma clair de diffusion semencière où les agriculteurs sont les principaux acteurs (Baco et *al.*, 2007). Par ailleurs, certains producteurs, par mesure de prudence, ont adopté de nouvelles cultures plus résistantes à la sécheresse notamment l'ananas, le taro, le bananier, le papayer. Le labour, la fertilisation et l'utilisation des bas-fonds sont faiblement adoptés, soit en raison du coût de la main d'œuvre (labour) ou d'achat d'intrants, soit par manque de ressources foncières. Cela confirme que l'adoption des mesures d'adaptation est déterminée en partie par les conditions socioéconomiques, comme l'ont souligné Deressa et *al.* (2009), Ouédraogo et *al.* (2010), Hisali et *al.* (2011), Below et *al.*, (2012). Les CE ont également diversifié leurs sources de revenus en adoptant de nouvelles activités telles que la transformation agroalimentaire, la vente de charbon de bois et l'élevage.

L'évaluation de l'adoption de variétés à cycle court et de la modification des dates de semis a fait l'objet de plusieurs articles (Butt et *al.*, 2005 ; Tingem et Rivington, 2009). Ces auteurs simulent le rendement de certaines cultures avec et sans adaptation. Ils considèrent de nouvelles dates de semis et d'hypothétiques variétés améliorées. Il apparaît que ces options augmentent nettement les rendements vis-à-vis de probables évolutions futures du climat en Afrique de l'Ouest. Ils montrent ainsi la pertinence de ces mesures d'adaptation vis-à-vis des changements clima-

tiques. Cependant, en comparant le démarrage de la grande saison des pluies avec la période de semis optimale de cette saison pour la variété DMR-ESR-W du maïs dans la région d'étude (première moitié de mai), il apparaît que les pluies débutent un mois environ avant la période de semis. Ce décalage montre que malgré son rétrécissement, après 1970, la durée de la grande saison des pluies ne constitue pas un facteur restrictif pour la maïsiculture de cycle long (120 jours) sur le plateau d'Allada. Un constat similaire a été fait par Noufé et *al.* (2011) en Côte d'Ivoire. En effet, l'utilisation d'une variété de maïs de 120 jours pour la grande saison des pluies ferait reculer la période de semis optimale d'environ un mois, coïncidant ainsi avec la date de démarrage des pluies. Cela correspondrait davantage à la stratégie des agriculteurs qui consiste à semer le plus tôt possible (Kouressy et *al.*, 2008), pour réduire la perte d'azote dans le sol induite par les processus de lessivage et de dénitrification (Blondel et *al.*, 1971) et maîtriser les adventices (Andrews, 1973 ; Stoop et *al.*, 1981 ; Vacksmann et *al.*, 1996). Quant à la petite saison des pluies, la variété de cycle de 90 jours semble bien adaptée à cette saison.

Bien que les CE aient changé leur pratique de production face aux changements climatiques, ces derniers sont limités par le manque d'informations climatiques, comme l'alerte précoce sur les risques climatiques possibles. Un constat similaire a également été fait dans le Sud-Ouest du Nigeria par Sofoluwe et *al.* (2011) en Ethiopie et en Afrique du Sud par Bryan et *al.* (2009). En effet, plusieurs agriculteurs ont affirmé avoir perdu la quasi totalité de leurs semences de maïs du fait des crues qui surviennent brusquement et précocement, montrant ainsi l'inefficacité des premières mesures d'adaptation. Cela rejoint les conclusions de Tschakert (2007), qui a montré que les agriculteurs manquent encore de stratégies d'adaptation efficaces face aux fortes précipitations et aux crues dans le Sahel. Par ailleurs, certains agriculteurs ont évoqué les coûts des mesures d'adaptation comme contraintes à l'adaptation aux changements climatiques. Par exemple, pour s'affranchir des pertes post récoltes de maïs dues aux insectes et aux rongeurs, des systèmes améliorés de grenier ont été vulgarisés (Adégbola et *al.*, 2011). Cependant, malgré que les CE aient reconnu l'efficacité technique de ces systèmes, ils ne les ont pas encore adoptés en raison du coût de réalisation (construction du grenier, achat des produits de conservation).

Dans l'application du modèle SARRA-H, nous avons montré que malgré son rétrécissement, après 1970, la durée de la grande saison des pluies ne constitue pas un facteur restrictif pour la maïsiculture de cycle long (120 jours) sur le plateau d'Allada. Cette application a également permis de montrer qu'en adoptant une variété de maïs de 90 jours pour la grande saison des pluies, on accroît les risques de pertes post-récoltes de rendement du fait de la forte probabilité que la période de dessiccation des grains débute avant la fin de la grande saison des pluies. Ce fait est lié à la longueur du cycle végétatif (90 jours) de cette variété, relativement juste par rapport à celle de la grande saison des pluies (environ 95 jours). Pour s'affranchir des récoltes en pleine période humide, les maïsiculteurs retardent les semis. Cependant, ils courent le risque de perte d'azote dans le sol et d'émergence des adventices. En revanche, pour la petite saison des pluies, la variété de cycle de 90 jours semble bien adaptée à cette saison. En conséquence, l'hypothèse de l'étude selon laquelle les mesures d'adaptation des maïsiculteurs sont pertinentes vis-à-vis des changements climatiques ne peut être confirmée pour les deux saisons des pluies.

Conclusion générale et perspectives

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes focalisé sur la gestion des changements climatiques par les maïsiculteurs du plateau d'Allada. Si cette gestion peut être analysée de plusieurs manières, cette étude s'est surtout intéressée aux perceptions des changements climatiques desdits maïsiculteurs et aux mesures d'adaptation qu'ils ont adoptées pour faire face auxdits changements. Ce choix se justifie par :

- le rôle déterminant des perceptions dans l'orientation des stratégies d'adaptation aux changements climatiques des maïsiculteurs ;
- la nécessité de réduire la vulnérabilité des petits exploitants agricoles aux aléas climatiques et d'accroître la sécurité alimentaire

Spécifiquement, la présente étude vise à :

- analyser la cohérence des perceptions des changements climatiques par les producteurs agricoles avec les observations climatiques ;
- évaluer la pertinence des mesures d'adaptation adoptées par les populations rurales.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons dû :

- caractériser les tendances climatiques aux échelles régionale et locale ;
- analyser les perceptions des changements climatiques chez les maïsiculteurs et les mesures d'adaptation qu'ils prennent face audits changements ;
- simuler les rendements agricoles potentiels de maïs sur la base de données climatiques historiques.

Les principales conclusions qui se dégagent de ce travail sont :

- **la variabilité interannuelle des pluies est différente entre la grande saison des pluies et la petite saison des pluies**

« L'équilibre pluviométrique » précédemment établi entre la grande saison des pluies et la petite saison des pluies se modifie depuis les années 1990. Après la sécheresse des années 1970 et 1980, marquée par la diminution des jours pluvieux sur ces deux saisons pluvieuses, la grande saison des pluies a continué d'enregistrer une baisse de l'occurrence des jours pluvieux à l'inverse de la petite saison des pluies qui enregistre un regain des jours pluvieux. De fait, la grande saison des pluies n'enregistre que 7% de regain pluviométrique entre 1971-1990 et 1991-2010, pendant que la petite saison des pluies enregistre presque le triple, soit 20%. Cette information est robuste à l'échelle du Sud-Bénin entier. En outre, la grande saison des pluies se caractérise après 1970 par l'installation tardive des pluies, tandis que la petite saison des pluies présente une tendance à la précocité des pluies. De ce fait, la grande saison des pluies a considérablement raccourci après 1970, alors que la longueur de la petite saison des pluies est globalement restée inchangée, voire plus longue.

- **la variabilité interannuelle des rendements potentiels maximaux est différente entre la grande saison des pluies et la petite saison des pluies**

Les précipitations étant un des facteurs déterminants de la variabilité interannuelle des rendements, la différence de variabilité pluviométrique entre la grande saison des pluies et la petite saison des pluies a eu pour conséquence une baisse tendancielle des rendements potentiels maximaux pendant la grande saison des pluies, alors qu'ils sont en progression pendant la petite saison des pluies. La durée moyenne des séquences sèches explique mieux ces tendances des rendements. La mise en évidence des tendances des rendements agricoles potentiels pour la grande saison des pluies et la petite saison des pluies est un résultat important. En effet, ce résultat peut être utile pour orienter les efforts d'adaptation relatifs à la grande saison des pluies (adaptation variétale, gestion de l'eau, fertilisation...) et aussi pour revaloriser la petite saison des pluies auprès des agriculteurs qui ne lui ont généralement accordé qu'un intérêt limité. Ce résultat montre également la pertinence à considérer l'échelle saisonnière pour analyser les impacts du climat sur l'agriculture pluviale en Afrique de l'Ouest.

- **l'augmentation des températures et la baisse des vitesses de vents pendant les saisons de l'année**

Les analyses des températures journalières et des vitesses instantanées maximales journalières de vents ont respectivement montré qu'il fait de plus en plus chaud et que les vents sont de moins en moins violents quelle que soit la saison de l'année considérée. Si la hausse des températures est régulièrement mise en avant dans la littérature, la mise en évidence de la diminution des vitesses instantanées maximales journalières de vents au Sud-Bénin est un résultat nouveau.

- **les CE sont davantage marqués par les sécheresses des années 1970 et 1980 que par le regain pluviométrique des années 1990 et 2000**

Lorsqu'on intègre les perceptions des changements des précipitations à l'échelle du plateau d'Allada (échelle régionale), elles sont plus proches des tendances pluviométriques observées entre 1951-1970 et 1971-1990 que de celles observées entre 1971-1990 et 1991-2010, quelle que soit la saison des pluies considérée. Toutefois, à l'échelle locale, ce constat est influencé par la position géographique des CE, en l'occurrence pour les perceptions relatives à la petite saison des pluies, celles relatives à la grande saison des pluies demeurant inchangées. En effet, pour la petite saison des pluies, les changements des précipitations observés sur la station de Niaouli (station de référence) entre 1951-1970 et 1971-1990 sont davantage perçus par les CE éloignés de la station, alors que les CE proches de la station sont plus marqués par les changements observés entre 1971-1990 et 1991-2010.

- **les perceptions des CE des changements de température et de vents divergent avec les tendances climatiques**

Les CE ne perçoivent pas le réchauffement climatique pendant les saisons pluvieuses, alors que les tendances climatiques montrent bien une augmentation des températures pendant toutes les saisons de l'année. De la même manière les CE citent généralement l'occurrence de vents violents sur toutes les saisons de l'année, à l'exception de la grande saison sèche. Ce fait est contraire aux observations climatiques qui montrent une diminution de la fréquence des vents violents pendant toutes les saisons de l'année. Si dans le cas de la température, cet écart de perception peut s'expliquer par l'occurrence des pluies en saison pluvieuse, dans le cas des vents, cet écart de perception peut traduire une vulnérabilité accrue des cultures aux effets des vents.

- **certaines mesures d'adaptations des CE ne concordent pas avec les caractéristiques saisonnières actuelles**

Les principales mesures d'adaptation adoptées par les CE font référence aux pratiques de production (la modification des dates de semis, l'adaptation variétale, l'utilisation des bas fonds etc...), mais aussi à la gestion des revenus (diversification d'activités secondaires, transformation agroalimentaire, fabrication de charbon de bois, etc...). La modification des dates de semis et l'adaptation variétale sont, selon les CE, leurs réponses au raccourcissement des saisons pluvieuses. Les CE sèment plus tardivement qu'autrefois et préfèrent les variétés de maïs à cycle court (75 à 90 jours) à celles à cycle plus long (120 jours). Toutefois, même si la grande saison des pluies a considérablement raccourci après 1970, le choix d'une variété de maïs de 90 jours ou moins, soulève plusieurs questionnements relatifs au calendrier agricole. En effet, pour que cette variété s'adapte à la distribution intrasaisonnière des pluies au sein de la grande saison des pluies, il aurait fallu que la date de semis soit dans la première décade de mai. Or, les pluies de cette saison débutent un mois plus tôt. Cette situation est contraire à la stratégie des agriculteurs qui consiste à semer dès les premières pluies, assumant ainsi le risque de perdre des semences en raison d'un échec du semis dû à un faux démarrage des pluies. Ce décalage peut également favoriser la perte d'azote dans le sol induite par les processus de lessivage et de dénitrification (Blondel et *al.*, 1971) et l'émergence des adventices (Andrews, 1973 ; Stoop et *al.*, 1981 ; Vacksmann et *al.*, 1996). Même si des travaux supplémentaires sont nécessaires pour le confirmer, il semble que les variétés de maïs de 120 jours sont toujours compatibles à la longueur actuelle de la grande saison des pluies et que l'on peut les semer au moment de l'installation des pluies où le taux de semis réussis est de l'ordre de 95%. Toutefois, la variété de maïs de 90 jours est en phase avec les caractéristiques saisonnières de la petite saison des pluies, dès lors qu'elle est semée dans la première décade de septembre. Par ailleurs, la généralisation de certaines mesures d'adaptation telles que la fabrication du charbon de bois, la conduite de taxi moto est susceptible d'engendrer des pressions sur les ressources naturelles aggravant les impacts des changements climatiques et de favoriser l'exode rural.

Au regard de ces conclusions, certains questionnements scientifiques méritent d'être approfondis. Ainsi, plusieurs pistes de recherches sont en perspective. Il s'agit notamment :

- **d'organiser des ateliers participatifs avec les exploitants agricoles pour mieux comprendre les sources des divergences entre leurs perceptions des changements climatiques et les observations climatiques**

Tout au long de cette étude, nous avons tenté d'expliquer les divergences entre perceptions et observations climatiques par des connaissances « scientifiques ». Or, les agriculteurs ont, au fil des générations, construit des repères climatiques qui ont une séquence précise tout au long de l'année et qui leur indiquent les opérations culturales et le calendrier agricole. Ainsi, les perturbations de ces concepts socio-anthropologiques préétablis constituent des repères de changements climatiques pour les producteurs (Vissoh et *al.*, 2012). La connaissance de ces concepts, leur manifestation et leur évolution dans le temps peuvent être utiles pour expliquer les divergences entre perceptions et observations climatiques. A cet effet, les ateliers participatifs peuvent constituer un moyen privilégié de collectes d'informations sur lesdits concepts.

- **d'étudier l'impact du climat futur sur les rendements agricoles potentiels à l'échelle saisonnière sur la base de différents scénarii climatiques**

Nous avons mis en lumière dans cette étude des différences d'impacts du climat sur les rendements potentiels de la grande saison des pluies et de la petite saison des pluies en utilisant les données climatiques historiques. Nous avons ainsi montré que les études d'impacts climatiques à l'échelle annuelle sur l'Afrique de l'Ouest entière ne sont pas pertinentes aux échelles saisonnières et locales. Il existe de nombreux articles et rapports faisant état de projections futures des rendements en Afrique subsaharienne en réponse aux changements environnementaux (Challinor et *al.*, 2007). Cependant, ces études ne font souvent pas cas de la région guinéenne et considèrent l'échelle annuelle au détriment de l'échelle saisonnière. Pour affiner ces projections futures, il importe d'étudier l'impact du climat futur sur les rendements agricoles potentiels à l'échelle saisonnière en région guinéenne.

- **d'évaluer l'adéquation de variétés de maïs à cycle long (120 jours) aux caractéristiques saisonnières actuelles et futures de la grande saison des pluies**

Cette perceptive s'inscrit logiquement dans le prolongement et l'approfondissement de l'étude des risques liés au choix de la stratégie de gestion du calendrier agricole débuté dans cette étude. Elle permettra de vérifier l'hypothèse selon laquelle une variété de maïs de 120 jours est encore compatible avec la longueur de la grande saison des pluies et renseignera sur cette compatibilité à long terme.

Références bibliographiques

Abidji MW, Dèdèhouanou H, Vissoh P, Agbossou E, Guibert H, 2012. Climate changes and farmer's endogenous adaptation strategies : socio economic analysis of the dynamic use of agricultural lands in central region in Benin. *African Crop Science Journal* 20 (Issue Supplement s2) : 193-202.

Adda C, Borgemeister C, Biliwa A, Meikle WG, Markham RH, Poehling HM, 2002. Integrated pest management in post-harvest maize : a case study from the Republic of Togo (West Africa). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93 : 305-321.

Adégbola YP, Arouna A, Houedjissin RC, 2011. Analyse des perceptions paysannes des problèmes et des systèmes de stockage du maïs au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro spécial 2 : 33-42.

Adejuwon JO, 2006. Food crop production in Nigeria. II. Potential effects of climate change. *Climate Research* 32 : 229-245.

Afouda AA, 1985. *Contribution à la représentation mathématique du fonctionnement hydrodynamique des bassins versants*. Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse (France).

Agbossou EK, Toukon C, Akponikpè PBI, Afouda A, 2012. Climate variability and implications for maize production in benin : a stochastic rainfall analysis. *African Crop Science Journal* 20 (Issue Supplement s2) : 493-503.

Agossou DSM, Tossou CR, Vissoh VP, Agbossou KE, 2012. Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles béninois. *African Crop Science Journal* 20 (Issue Supplement s2) : 565-588.

Al Hamndou D, Requier-Desjardins M, 2008. Variabilité climatique, désertification et biodiversité en afrique : s'adapter, une approche intégrée, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]* 8 : 1. URL : <http://vertigo.revues.org/5356>. DOI : 10.4000/vertigo.5356.

Alagarswamy G, Reddy DM, Swaminathan G, 1998. Duration of the photoperiod-sensitive and -insensitive phases of time to panicle initiation in sorghum. *Field Crops Research* 55 : 1-10.

Ali A, Lebel T, 2008. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.*.. doi : 10.1002/joc,1832.

Ali A, Lebel T, Amani A, 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* 19 : 227-35.

Allé CSUY, Vissoh PV, Guibert H, Agbossou KE, Gozé E, Afouda AA, 2013. Changements climatiques, perceptions et Adaptations des producteurs sur le plateau d'Allada au sud du Bénin. *European Journal of Scientific Research* 107 : 530-545.

Allé CSUY, Vissoh PV, Guibert H, Agbossou KE, Afouda AA, 2013. Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]* 13 : 3. doi : 10.4000/vertigo.14361. URL : <http://vertigo.revues.org/14361>.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. *Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome (Italie) : FAO.

Andrews DJ, 1973. Effects of date of sowing on photosensitive Nigerian sorghums. *Experimental Agriculture* 9 : 337-346.

Andrews DJ, Bramel-Cox P, 1994. Breeding cultivars for sustainable crop production in low input dry land agriculture in the tropics. In : Buxton DA, eds. *International Crop Science I*. Madison, WI, USA : CSSA p. 211-222.

Anonyme, 2002. *Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal*. Rapport technique du Fonds National de Recherches Agricoles et Agroalimentaires (FNRAA).

Apata TG, Samuel KD, Adeola AO, 2009. *Analysis of Climate Change Perception and Adaptation among Arable Food Crop Farmers in South Western Nigeria*. Contributed

Paper prepared for presentation at the International Association of Agricultural Economists' 2009 Conference. Beijing (China). 16–22

Baco MN, Biaou G, Pinton F, Lescure J-P, 2007. Les savoirs paysans traditionnels conservent-ils encore l'agrobiodiversité au Bénin ? *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11(3) : 201–210.

Balme M, Galle S, Lebel T, 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse* 16 : 15-22.

Balme M, Lebel T, Amani A, 2006. Années sèches et années humides au Sahel : Quo vadis ? *Hydrol. Sci. J*, 51(2) : 254-271.

Bankoff G, Frerks G, Hilhorst D, 2003. *Mapping vulnerability : disasters, development and people*. London : Earthscan.

Baudoin M-A, 2012. *Etude de l'adaptation aux changements climatiques des populations rurales africaines. Le cas de communautés agricoles au sud du Bénin*. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles (Belgique).

Barbier B, Yacouba H, Karambiri H, Zoromé M, Somé B, 2009. Human vulnerability to climate variability in the Sahel : Farmer's adaptation strategies in Northern Burkina Faso. *Environmental Management* 43 : 790-803.

Barrios S, Ouattara B, Strobl E, 2008. The impact of climatic change on agricultural production : Is it different for Africa ? *Food Policy* 33 : 287-298.

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traore S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M, 2005. From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modelling of climate impact. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 360 : 1463 2095-2108.

Below TB, Mutabazi KD, Kirschke D, Franke C, Sieber S, Siebert R, Tscherning K, 2012. Can farmers' adaptation to climate change be explained by socio-economic household-level variables ? *Global Environ Change* 22 : 223–235

Berg A, 2011. *Représentation des cultures tropicales dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE : apport à l'étude des interactions climat/agriculture*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI - Pierre et Marie Curie (France).

Blondel D, 1971. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral : en sol sableux au Sénégal. *Agronomie Tropicale* 26 : 1303-1333.

Boukari M, 1998. *Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources*. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).

Breman H, Groot JJR, Van Keulen H, 2001. Resource limitations in Sahelian agriculture. *Global Environment Change* 11 : 59-68.

Brou YT, Akindès F, Bigot S, 2005. La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures* 14(6) : 533-540.

Bryan E, Deressa TT, Gbetibouo GA, Ringler C, 2009. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa : options and constraints. *Environ. Sci. Policy*. 12 : 413-426.

Butt T, McCarl B, Angerer J, Dyke P, Stuth J, 2005. The economic and food security implications of climate change in mali. *Climatic Change* 68 : 355-378.

Camberlin P, Diop M, 2003. Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Clim. Res.* 23 : 159-69.

Camberlin P, Moron V, Okoola R, Philippon N, Gitau W, 2009. Components of rainy seasons' variability in Equatorial East Africa : onset, cessation, rainfall frequency and intensity. *Theoretical Applied Climatology* 98 : 237-249.

Caminade C, Terray L, 2010. Twentieth century Sahel rainfall variability as simulated by the Arpege AGCM, and future changes. *Climate Dyn.* 26 : 75-94. doi : 10.1007/s00382-009-0545-4.

Caniaux G, Giordani H, Redelsperger J-L, Guichard F, Key E, Wade M, 2011. Couplings between the Atlantic cold tongue and the African monsoon in boreal spring and summer. *J. Geophys. Res.* 116 : C04003. doi :10.1029/2010JC006570.

- Caske JE Jr.**, 1963. A Markov Chain model for the probability of precipitation occurrence in intervals of various lengths. *Mon. Wea. Rev.* 91 : 298-301.
- CGIAR**, 2009. *Climate, agriculture and food security : a strategy for change*. Alliance of the CGIAR Centers.
- Challinor A, Wheeler T, Garforth C, Craufurd P, Kassam A**, 2007. Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Climatic Change* 83 : 381-399.
- Charney JG, Quirk WJ, Show SH, and Kornfield J**, 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi arid regions. *Journal of Atmospheric Science* 34 : 1336-1385.
- Chuku C Okoye C**, 2009. Increasing resilience and reducing vulnerability in sub-Saharan African agriculture : Strategies for risk coping and management. *African Journal of Agricultural Research* 4 : 1524-1535.
- Collins JM**, 2011. Temperature Variability over Africa. *Journal of Climate* 24 : 3649-3666.
- Daane J, Mongbo R, Schamhart R**, 1992. *Méthodologie de la recherche socioéconomique en milieu rural africain*. Abomey-calavi (Bénin).
- Deressa TT, Hassan RM, Ringler C, Alemu T, Yesuf M**, 2009. Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environ Change* 19 : 248-255.
- de Rouw A**, 2004. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems* 81 : 73-93.
- Dilley M, Chen RS, Deichmann U, Lerner-Lam AL, Arnold M**, 2005. *Natural disaster hotspots : a global risk analysis*. Disaster Risk Management Series 5. Washington DC : the World Bank
- Dinar A, Hassan R, Mendelsohn R, Benhin J**, 2008. *Climate Change and Agriculture in Africa. Impact Assessment and Adaptation Strategies*. Earthscan Climate. London (Royaume Uni) : Routledge Press.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, Maraun F, Sarr B, Sultan B, Clopes A, Forest F, 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In : Struif Bontkes TE, Wopereis MCS, eds. *Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa - a practical guide*. Muscle Shoals, Alabama (USA) : IFDC, 127-139.

Dingkuhn M, Johnson DE, Sow A, Audebert AY, 1999. Relation-ship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Res.* 61 : 79-95.

Diop M, 1996. A propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse* 7 : 7-15.

Doorenbos J, Kassam AH, 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and drainage paper 33. Rome (Italie) : FAO.

Erpicum M, Binard M, Peters JP, Alexandre J, 1988. Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (Exemples pris au Sénégal). In Erpicum, eds. *Actes des Journees de Climatologie*. Mont-Rigi (Belgique) : Presses Universitaires de Liege, p. 43-56.

FAO, 2003. *The state of food insecurity in the world*. Rome : Food and Agricultural Organisation.

FAO, 2006. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*. Rapport annuel, Collection FAO : Agriculture, 37.

Feyerheram M, Barkl D, 1965. Statistical Methods for Persistent Precipitations Patterns. *J. Appl. Meteorol* 4 : 320-328.

Folland CK, Palmer TN, Parker DE, 1986. Sahel rainfall and world sea temperatures, 1901-85. *Nature* 320 : 602-607.

Fontaine B, Roucou P, Camara M, Vigaud N, Konaré A, Sanda SI, Diedhiou A, Janicot S, 2012. Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine. *La Météorologie Spécial AMMA* : 41-48.

- Fontaine B, Louvet S, Roucou P**, 2008. Definition and predictability of an OLR-based West African monsoon onset. *International Journal of Climatology* 28 : 1787-1798.
- Forest F, Clopes A**, 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In : Reyniers FN, Netoyo L, eds. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale*. Paris : John Libbey Eurotext, p. 3-15.
- Fosu-Mensah BY, Vlek PLG, MacCarthy DS**, 2012. Farmers' perception and adaptation to climate change : a case study of Sekyedumase district in Ghana. *Environ Dev Sustain* 14 : 495-505.
- Frappart F, Hiernaux P, Guichard F, Mougin E, Kergoat L, Arjounin M, Lavenu F, Koite M, Paturel JE, Lebel T**, 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology* 375 : 128-142.
- Gaillard JC**, 2010. Vulnerability, capacity and resilience : perspectives for climate and development policy. *Journal of International Development, Policy Arena* 22 : 218-232.
- Gbaguidi VS, Gbaguidi GA, Adjovi E, Amey K, Zankpe M, Danvi A-E, Alodehou E**, 2011. Cartographie des directions dominantes des vents au Bénin : outil de conception et de dimensionnement des ouvrages. *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo) Série E*, 13(1) : 1-16.
- GIEC**, 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité*. Cambridge (Royaume-Uni) : Cambridge University Press.
- GIEC**, 2007. *The IPCC fourth assessment report*. Cambridge (Royaume-Uni) : Cambridge University Press.
- Gillies MT**, 1953. The duration of the gonotrophic cycle in *Anopheles gambiae* and *An. funestus* with a note on the efficiency of hand catching. *East African Medical Journal* 30 : 129-135.
- Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE, Patz JA**, 2000. Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : une analyse régionale. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé Recueil d'articles* N°4 : 62-72.

Gnanglè CP, Glèlè Kakaï R, Assogbadjo AE, Vodounnon S, Yabi JA, Sokpon N, 2011. Tendances climatiques passées, modélisation, perceptions et adaptations locales au Bénin. *Climatologie* 8 : 27-40.

Hansen JW, 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems* 74 : 309-330.

Hamatan M, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Amani A, 2004. Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 15 : 279-286.

Hisali E, Birungi P, Buyinza F, 2011. Adaptation to climate change in Uganda : evidence from micro level data. *Global Environ Change* 21 : 1245-1261.

Hopkins JW, Robillard P, 1964. Some statistics of daily rainfall occurrence for the Canadian prairie provinces. *J. Appl. Meteorol* 3 : 600-602.

Houndénou C, 2006. *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne (France).

Ingram KT, Roncoli MC, Kirshen PH, 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina-Faso as a case study. *Agricultural System* 74 : 331-349.

INSAE (Institut National de La Statistique et de l'Analyse Economique), 2002. *Troisième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-3)* Cotonou (Bénin) : INSAE.

INSAE (Institut National de La Statistique et de l'Analyse Economique), 2013. *Résultats provisoires du quatrième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-4)* Cotonou (Bénin) : INSAE.

Kiniry JR, Jones CA, O'Toole JC, Blanchet R, Cabelguenne M, Spanel DA, 1989. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain –filling for five grain-crop species. *Field Crops Res.* 20 : 51-64.

Kisauzi T, Mangheni MN, Sseguya H, Bashaasha B, 2012. Gender dimensions of farmers' perceptions and knowledge on climate change in Teso sub-region, eastern Uganda. *African Crop Science Journal* 20(Issue Supplement s2) : 275-286.

Klopper E, Vogel C, Landman W, 2006. Seasonal Climate Forecasts – Potential Agricultural-Risk Management Tools? *Climatic Change* 76 : 73-90.

Kniveton DR, Layberry R, Williams Mika Peck CJR, 2008. Trends in the start of the wet season over Africa. *International Journal of Climatology*.

Koné D, 1991. Caractérisation du risque climatique de la culture du maïs en zone centre Côte d'Ivoire. In : Sivakumar MVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C, eds. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. Proceedings of the Niamey Workshop, IAHS Publ. 199. Wallingford : IAHS Press, 515–521.

Kouassi AM, Kouamé KF, Koffi YB, Dje KB, Paturel JE, Oulare S, 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog-European Journal of Geography (Environnement, Nature, Paysage)* article 513, URL : <http://cybergeog.revues.org/23388>.

Kouressy M, Dingkuhn M, Vaksman M, Heinemann AB, 2008. Adaptation to diverse semiarid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 : 357-371.

Kpadonou RAB, Adégbola PY, Tovignan SD, 2012. Local knowledge and adaptation to climate change in Ouémé valley, Benin. *African Crop Science Journal* 20(Issue Supplement s2) : 181-192.

Kruskal W, Wallis WA, 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47(260) : 583–621. doi : 10.1080/01621459.1952.10483441.

Lallau B, 2008. Les agriculteurs africains entre vulnérabilité et résilience. Pour une approche par les capacités de la gestion des risques. *Revue Française de socio économie* 1 : 177-198.

Lamb PJ, 1978. Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with sub-saharan weather anomalies. *Tellus* 30 : 240-251.

Lalande A, 1985. *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Paris : PUP.

Lawin EA, Moumouni S, Akponikpè PBI, Kiki C, Afouda A, 2013. Variabilité des dates de début, de fin et de la durée de la petite saison des pluies a Cotonou, Bénin.

In : Boko M, Vissin EW, Afouda F, eds. *Climat agriculture ressources en eau d'hier à demain*. Actes du XXVI^{ème} colloque international de Association Internationale de Climatologie. Cotonou (Bénin) : AIC, 336-341.

Lawin AE, Afouda A, Lebel T, 2011. Analyse de la Variabilité du Régime Pluviométrique dans la Région Agricole d'Ina au Bénin. *European Journal of Scientific Research* 50(3) : 425-439.

Le Barbé L, Alé G, Millet B, Borel Y, Gualde R, 1993. *Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin*. Paris (France) : ORSTOM Editions.

Le Barbé L, Lebel T, 1997. Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol.* 188-189 : 43–73.

Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D, 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *J. Climate* 15(2) : 187–202.

Lebel T, Ali A, 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *J. Hydrol.* 375 : 52-64.

Le Lay M, Galle S, 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Hydrol. Sci. J.* 50(3) : 509-524.

Howard L, 1960. Robust tests for equality of variances. In : Oklin I, Hotelling H, et al., eds. *Contributions to Probability and Statistics : Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press. 278–292.

Monteith JL, Huda AKS, Midya D, 1989. RESCAP : a ressource capture model for sorghum and Pearl millet. In : Virmani SM, Tandon HLS, Alagarswamy G, eds. *Modelling the growth and the development of sorghum and Pearl Millet*. Research Bulletin 12. Patancheru, A.P. 502 324 (India) : ICRISAT, 30-34.

L'hote Y, Mahe G, Some B, Triboulet J, 2002. Analysis of a sahelian rainfall index from 1896 to 2000 : the drought continues. *Hydrological Sciences Journal* 47 : 563-572.

Louvet S, Fontaine B, Roucou P, 2003. Active phases and pauses during the installation of the West African monsoon through 5-day CMAP rainfall data (1979-2001). *Geophysical Research Letter* 30. doi :10.1029/2003GL018058.

- Macharia PN, Thuranira EG, Ngángá LW, Lugadiru J, Wakori S**, 2012. Perceptions and adaptation to climate change and variability by immigrant farmers in semi-arid regions of Kenya. *African Crop Science Journal* 20(Issue Supplement s2) : 287-296.
- Marteau R, Sultan B, Moron V, Alhassane A, Baron C, Traoré SB**, 2011. The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agr. Forest Meteorol.* 151 : 1356-1369.
- Mertz O, Mbow C, Nielsen J, Maiga A, Diallo D, Reenberg A, Diouf A, Barbier B, Bouzou Moussa I, Zorom M, Ouattara I, DD**, 2010. Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society* 15.
- Mertz O, Mbow C, Reenberg A, Diouf A**, 2009. Farmers' Perceptions of Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies in Rural Sahel. *Environmental Management* 43 : 804-816.
- Mertz O, Mbow C, Reenberg A, Genesio L, Lambin EF, D'haen S, Zorom M, Rasmussen K, Diallo D, Barbier B, Bouzou Moussa I, Diouf A, Nielsen JO, Sandholt I**, 2011. Adaptation strategies and climate vulnerability in the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Atmos. Sci. Let.* 12 : 104-108.
- Monteith JL, Huda AKS, Midya D**, 1989. RESCAP : a ressource capture model for sorghum and Pearl millet. In : Virmani SM, Tandon HLS, Alagarswamy G, eds. *Modelling the growth and the development of sorghum and Pearl Millet*. Research Bulletin 12. Patancheru, A.P. 502 324 (India) : ICRISAT, 30-34.
- Moron V, Robertson AW, Ward MN, Camberlin P**, 2007. Spatial coherence of tropical rainfall at the regional scale. *Journal of Climate* 20 : 5244-5263.
- Mounier F, Janicot S, Kiladis GN**, 2008. The West African monsoon dynamics. Part III : The quasi-biweekly zonal dipole. *Journal of Climate* 21 : 1911-1928.
- Moyo M, Mvumi BM, Kunzekweguta M, Mazvimavi K, Craufurd P, Dorward P**, 2012. Farmer perceptions on climate change and variability in semi-arid Zimbabwe in relation to climatology evidence. *African Crop Science Journal* 20(Issue Supplement s2) : 317-335.

Müller C, Bondeau A, Popp A, Waha K, Fader M, 2010. *Climate change impacts on agricultural yields*. Germany : Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK).

Nash J, Sutcliffe J, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I : A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 : 282-290.

Nelson GC, Rosegrant M, Koo J, Robertson R, Sulser T, Zhu T, Ringler C, Msangi S, Palazzo A, Batka M, Magalhaes M, Valmonte-Santos R, Ewing M, Lee D, 2009. *Climate Change : Impact on agriculture and costs of adaptation*. Washington, D.C. : International Food Policy Research Institute.

New M, Hewitson B, Stephenson DB, Tsiga A, Kruger A, Manhique A, Gomez B, Coelho CAS, Masisi DN, Kululanga E, Mbambalala E, Adesina F, Saleh H, Kanyanga J, Adosi J, Bulane L, Fortunata L, Mdoka ML, Lajoie R, 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *J. Geophys. Res.* 111 : D14102.

Niang AJ, Ozer A, Ozer P, 2008. Fifty years of landscape evolution in South-Western Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments* 72 : 97-107

Nicholson S, Palao I, 1993. A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel. Part 1. Characteristics of rainfall fluctuations. *Int. J. Climatol.* 13 : 371-389.

Nielsen JÃ, Reenberg A, 2010. Temporality and the problem with singling out climate as a current driver of change in a small West African village. *Journal of Arid Environments* 74 : 464-474.

Noufé D, Lidon B, Mahé G, Servat E, Brou YT, Koli Bi Z, Chaléard JL, 2011. Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'est Ivoirien. *Hydrol. Sci. J.* 56 : 152-167.

O'Brien KL, Wolf F, 2010. A values-based approach to vulnerability and adaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 1(2) : 232-242.

Ouédraogo M, Dembélé Y, Somé L, 2010. Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso. *Sécheresse* 21(2) : 87-96.

Oyédé LM, 1991. *Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quaternaires et néogènes du domaine margino-littoral du Bénin (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne (France) et Université Nationale du Bénin (Bénin).

Ozer P, Erpicum M, 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse* 6 : 103-108.

Ozer P, Erpicum M, Demarée G, Vandiepenbeeck M, 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal* 48 : 489-492.

Ozer P, Hountondji Y-C, Ahomadegbé MA, Djaby B, Thiry A, De Longueville, 2013. Evolution climatique, perception et adaptation des communautés rurales du plateau d'Abomey (Bénin). In : Boko M, Vissin WE, Afouda F, eds. *Climat agriculture ressources en eau d'hier à demain*. Actes du xxvi^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Cotonou (Bénin) : AIC, p. 440-445.

Ozer P, Hountondji Y-C, Laminou MO, 2009. Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop* 33 : 11-30.

Paeth H, Capo-Chichi A, Endlicher W, 2008. Climate Change and food security in tropical West Africa - a dynamic-statistical modelling approach. *Erdkunde* 62 : 101-115.

Patt AG, Tadross M, Nussbaumer P, Assante K, Mertzger M, Rafael J, Goujon A, Brundrit G, 2010. Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Proceeding of the National Academy of Sciences* 107 : 1333-1337.

Paturel J-E, Servat E, Lubes-Niel H, Delattre MO, 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal* 43(6) : 937-946.

Payne WA, Lascano RJ, Hossner LR, Wendt CW, Onken AB, 1991. Pearl Millet growth as affected by phosphorus and water. *Agronomy Journal* 83 : 942-948.

Penning de Vries FWT, Jansen DM, Ten Berge HFM, Bakema A, eds, 1989. *Simulation of ecophysiological. Processes of growth in several annual crops*. Simulation Monographs 29. Wageningen, (The Netherlands) ; Los Baños (Philippines) : Pudoc ; International Rice Research Institute (IRRI).

Pohl B, Janicot S, Fontaine B, Marteau R, 2009. Implication of the Madden-Julian Oscillation in the 40-day variability of the West African Monsoon. *Journal of Climate* 22 : 3769-3785.

Poss R, 1991. *Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de barre du Togo. Conséquences agronomiques*. Thèse de Doctorat, Université Paris 6 (France).

Rahman S, 2003. Environmental impacts of modern agricultural technology diffusion in Bangladesh : an analysis of farmers' perceptions and their determinants. *Journal of Environmental Management* 68 : 183–191.

Rockström J, de Rouw A, 1997. Water, nutrients and slope position in on-farm pearl millet cultivation in the Sahel. *Plant and Soil* 195 : 311-327.

Romero R, Guijarro J, Alonso S, 1998. A 30 year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions : first exploratory study. *International Journal of Climatology* 18 : 541-560.

Roudier P, Sultan B, Quirion P, Berg A, 2011. The impact of future climate change on West African crop yields : what does the recent literature say ? *Global Environmental Change* 21 : 1073-1083.

Sané T, Diop M, Sagna P, 2008. Etude de la qualite de la saison pluvieuse en Haute-Casamance (Sud Senegal). *Sécheresse* 19 : 23-28.

Schipper ELF, Burton I, 2008. *The Earthscan Reader on Adaptation to climate change*. London (Royaume-Uni) : Routledge Press.

Servat E, Paturel JE, Lubès-Niel H, Kouamé B, Masson JM, Travaglio M, Marieu B, 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non Sahélienne. *Journal of Water Science* 12(2) : 363-387.

- Sofoluwe NA, Tijani AA, Baruwa OI**, 2011. Farmers' perception and adaptation to climate change in Osun State, Nigeria. *Afr. J. Agric. Res.* 6 : 4789–4794.
- Stoop WA, Pattanayak CM, Matlon PJ, Root WR**, 1981. A strategy to raise the productivity of subsistence farming systems in the West African semi-arid tropics. *Proceedings Sorghum in the Eighties*. Patancheru (India). ICRISAT : 519-526.
- Sultan B, Alhassane A, Barbier B, Baron C, Bella-Medjo Tsogo M, Berg A, Dingkuhn M, Fortilus J, Kouressy M, Leblois A, Marteau R, Muller B, Oettli P, Quirion P, Roudier P, Traoré SB, Vaksman M**, 2012. La question de la vulnérabilité et de l'adaptation de l'agriculture sahélienne au climat au sein du programme AMMA. *La Météorologie Spécial AMMA* : 64-72.
- Sultan B, Janicot S**, 2000. Abrupt shift of the ITCZ over West africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letter* 27 : 3353-3356.
- Sultan B, Janicot S**, 2003. The West African monsoon dynamics. Part II : The « pre-onset » and the « onset » of the summer monsoon. *Journal of Climate* 16 : 3407-3427.
- Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Saar B, Janicot S**, 2005. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agr. Forest Meteorol.* 128 : 1-2 93-110.
- Tambo AJ, Abdoulaye T**, 2012. Smallholder farmers' perceptions of and adaptations to climate change in the Nigerian savanna. *Regional Environmental Change* 13(2) : 375-388.
- Tingem M, Rivington M**, 2009. Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon : Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14 : 153-168.
- Traore S, Alhassane A, Muller B, Kouressy M, Some L, Sultan B, Oettli P, Laope ACS, Sangare S, Vaksman M, Mbaye Diop, Dingkhun M, Baron C**, 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric science letters* 12.
- Tschakert P**, 2007. Views from the vulnerable : Understanding climatic and other stressors in the Sahel. *Global Environmental Change* 17 : 381-396.

Turell MJ, 1989. Effects of environmental temperature on the vector competence of *Aedes fowleri* for Rift Valley fever virus. *Research in Virology* 140 : 147-154.

Usman M, Reason CJC, 2004. Dry spell frequencies and their variability over Southern Africa. *Climate Research* 26 : 199-211.

Vaksmann M, Traoré SB, Niangado O, 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement* 9 : 13-18.

Vissoh PV, Gbéhounou G, Achanchédé A, Kuyper W, Röling NG, 2004. Weeds as agricultural constraint to farmers in Benin : results of a diagnostic study. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences* 52 : 305-329.

Vissoh PV, Tossou RC, Dedehouanou H, Guibert H, Codjia OC, Vodouhe SD, Agbossou EK, 2012. Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements climatiques : le cas des communes d'Adjohoun et de Dangbo au Sud-Est Bénin. *Les Cahiers d'Outre-Mer* 260 : 479-492.

Ward N, Cook K, Diedhiou A, Fontaine B, Giannini A, Kamga A, Lamb PJ, Ben Mohamed A, Nassor A, Thorncroft C, 2004. Seasonal-to-decadal predictability and prediction of West African climate. *CLIVAR Exchanges* 9 : 3 14-20.

West CT, Roncoli C, Ouattara F, 2008. Local perceptions and regional climate trends on the Central Plateau of Burkina Faso. *Land Degradation and Development* 19 : 289-304.

Zheng X, Eltahir EAB, 1999. The Role of Vegetation in the Dynamics of West African Monsoon. *Journal of Climate* 11 : 2078-2096.